岩波科学ライブラリー 179

量子力学の反常識と素粒子の自由意志

筒井 泉

岩波書店

まえがき

名月や畳の上に松の影——其角

研究所からの散歩の途中、アインシュタインは突然立ち止まって振り返り、「月は君が眺めてる間だけ実在しているなどということを、ほんとうに信じているのかね」と私に尋ねた——A・パイス

清けき秋の夜、明るい月の光が部屋の中に射し込んで、畳の上に松影を映している。そのとき、たとえ月の姿を見ていなくとも、松の彼方の夜空に浮かぶ月はたしかに実在しているだろう。このあたりまえのことが、実は科学的には必ずしも正しくないのだと言われたら、読者はどのように思われるだろうか。

実のところ、科学の根幹にある物理学、そしてその物理学の基礎をなす量子力学が示唆するところは、まさにこの実在性への疑念なのである。むろん、量子力学の対象はミクロの世界であって、月のようなマクロのものではない。しかしミクロの世界だからと言って、実在性がなくてもかまわないのだろうか。仮にそうだとしても、実在性のないミクロの世界から

実在性のあるマクロの世界がどうやって作られるのか。またミクロとマクロの境界はいったいどこにあるのだろうか。

二〇世紀初頭に登場した量子力学は、一九世紀末に顕わになったニュートン以来の古典物理学の破綻を解決するために、いくつかの思い切った前提を理論体系の中に取り込んだ。その結果、量子力学はそれまでの常識的な世界像を覆し、きわめて革新的な自然界の認識を人類に迫るものとして、社会的にも大きな議論を呼び起こすことになった。量子力学は測定した結果を確率的にしか予言できないとする確率性を基本としており、測定によって位置や運動量などの物理量のすべてを同時に正確に決めることは原理的に不可能だとした。これが良く知られたハイゼンベルクの不確定性原理である。測定結果の確率性はそれまでの物理学が前提とした因果律を放棄することを意味し、また測定結果は連続的な値とは限らず、一般にとびとびの非連続的な値となった。つまり物理量は量子的な存在となったのである。

物理量の素朴な意味での実在性の否定はこれらの帰結であり、このような常識に反する世界像は物理学者の間にも大きな波紋を投げかけた。その中で当時、これを最も深刻にとらえ、激しく反発したのがアインシュタインであった。冒頭の言葉は、その彼の深い疑念の表明なのである。

アインシュタインは相対性理論を発表した同じ一九〇五年に、その数年前にプランクが提

案した光の量子説に基づいて、光を金属に当てたときの電子の放出現象（光電効果）を説明することに成功した。後にアインシュタインにノーベル賞を授けたのはこの光電効果の仕事であり、物理学の世界に量子的存在の重要性を認識させる大きな一歩となった。そしてこの革命の道は、二〇年後、ボーアやハイゼンベルクらによって完成される量子力学という見事な理論体系へとつながる。完成の暁、量子力学建設の立役者のボーアは、量子力学がもたらした世界像は、時空の概念を一新した相対性理論にも比較すべき物理学の大変革だと位置づけた。ところが意外なことに、アインシュタインは量子力学の有用性を認めながらも、確率性が意味する因果律の破綻や不確定性は本来の物理学が許容すべきものではないとして、終生、これを認めることはなかったのである。

一九三五年、アインシュタインは同僚のポドルスキーとローゼンとともに量子力学の問題点を追究し、それが理論として不完全なものだとする論文を発表する。三人の著者の頭文字からＥＰＲ論文と呼ばれるこの論文は、量子力学の深奥に、非実在性や確率性とともに非局所性と呼ばれる、測定によって瞬間的に互いに遠く離れた二つの対象に関係が生ずるという、きわめて常識に反する性質が潜んでいる可能性を見抜いたものとして、後年大きな影響力を持つことになる。そしてその議論の鍵となったのが、後に量子もつれ（エンタングルメント）と呼ばれる量子状態の不思議な性質であった。

量子力学の解釈をめぐるアインシュタインとボーアの論争は、実証不可能な、言わば高尚すぎる問題として長い間、物理学者から敬遠され無視された。しかしこの状況は一九六四年のベルの定理の発見によって一変する。ＥＰＲの議論が正しいかどうか、この定理に基づいて実験的な決着をつける道筋がつけられたからである。そしてその後の実験的検証によって、ＥＰＲ論文が議論の前提とした常識的な世界像が、自然界では成り立たないことが判明する。「アインシュタインが量子力学を攻撃するために持ち出した疑問の答えは確かにあったが、それは彼が望んだものではなかった——月は誰も眺めていないとき、確かにそこに実在していないのである」というマーミンの言葉が、その状況を端的に表わしている。

本書は、ＥＰＲ論文とベルの定理がどのように物理量の非実在性や非局所性の問題を炙り出したか、そして実験的検証がこれらの問題に対してどのような意味を持つのかについて、数式を一切使わずに、その本質をできるだけ正確に説明しようとするものである。これが可能なのは、彼らの論文が本質的には物理学の特別な知識を必要とせず、誰でも理解できるような常識的な感覚のみで議論がなされているからである。とは言っても一部に量子力学の性質を用いるところがあるから、予備知識ゼロでも理解できるよう、最低限必要な量子力学の説明を、第１章で手短かに与えておくことにする。

本書で説くような反常識的世界像が、自然界の究極の姿かどうかはまだわからない。また

その意味や解釈について、現在でも物理学者の間で議論が続いていることも確かである。しかし、このような自然に関する理解の根本的な問題に関して、現代の物理学の一応の到達点を一般の人たちが知っておくことは重要なことであり、我々が常識だとする世界像が科学的には支持されないことがあることを知るのも、無益なことではないだろう。

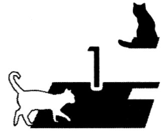
量子力学のもたらす反常識的な世界の衝撃は、哲学や文化の領域に留まらない。ベルの定理の検証実験の実現は二〇世紀末の著しい技術発展に負うものであるが、同じ頃、このような反常識性を将来の科学技術に利用しようとする機運が生まれた。既に実用段階に入った絶対安全な通信を保証する量子暗号や、きわめて高度な精密測定を可能にする量子度量衡学、さらにこれから実現が期待される量子計算などの量子情報科学は、このような考えに基づくものであり、量子もつれがもたらす反常識的な性質の応用を図ろうとするものである。その意味でも、量子力学の反常識的世界像の本質をよく理解することは、今後ますます重要になってくるものと思われる。

新たに二一世紀になって、因果性に関する新しい定理が提出された。自由意志定理と名づけられたこの定理は、もし測定者に自由意志があるとするならば、その測定対象にも——たとえそれが点状の素粒子であっても——同様の自由意志が存在すると主張するもので、ＥＰＲやベルの定理の議論で暗黙のうちに前提とされた自由意志の問題を、自然界の非因

果性と結びつけたものである。この定理は、自然界のあらゆる事象にはそれを決定づける原因があるとする因果的決定論が、現実の世界では成り立たないことを論証する。本書はこの新しい定理と、その基盤となっている物理量の状況依存性に関する議論(コッヘン–スペッカーの定理)も併せて紹介し、非実在性や非局所性とならんで、自然界の非因果性に関する最新の議論について解説を加える。

アインシュタインの孤独な思索の過程は、自ら咀嚼し理解したもののみが本物であり、それこそが人を豊かにし、人類の文化の発展に寄与するものであることを指し示している。本書を読まれた読者は、アインシュタインの疑問に対する裁定として果たしてマーミンが正しいかどうか、松影を映す月はほんとうに存在しないのか、そして自由意志とはいったい何かについて、夜の静寂の中、ひとりゆっくり考えをめぐらすのもよいのではなかろうか。

目次



1 量子力学とは
――スピンの世界

量子論に衝撃を受けていない人は、それを理解していない――Ｎ・ボーア

量子力学の立場

この本で説く実在性や局所性、因果的決定論に関する問題は、いずれもアインシュタインの量子力学への疑念に端を発したものである。その疑念をもっとも端的に提示したのが、彼がポドルスキーとローゼンと共著で発表し、著者らの頭文字からＥＰＲ論文と呼ばれる有名な論文であり、これは今日では量子力学的な自然像を考える上で最も重要な基本文献となっている。したがって、これらの問題を考察する自然な道筋は、ＥＰＲ論文にいたるアインシュタインの疑念の背景を理解することであるが、それには量子力学がいったいどういうものであるのか、まずはその概略を知る必要がある。そこで、ＥＰＲ論文の議論に入る前に、量子力学のエッセンスを手短かに述べておくことにしよう。

物理学は自然の法則を見つけ出すことにより、考察の対象——**物理系**(または単に**系**と呼ばれる)——の状態を知り、その変化を予言することを目的としている。系の状態は対象を物理的に特徴づける量——**物理量**——を決めることによって定めることができるが、量子力学はこれらの物理量の値そのものでなく、その測定結果に対する規定によって成り立っているところに特徴がある。物理量の値とその測定結果の二つは、一九世紀までの古典力学においては理想的な状況では一致するものと考えられていたが、ミクロな対象に対しては測定操作の影響が無視できない可能性があり、それらの一致は必ずしも明らかではない。

例えば、走っている自動車の速度はスピードガンで測ることができるが、これには電磁波の反射が用いられる。マクロな自動車の速度は、微弱な電磁波などにはまったく影響されないから、測られた速度は自動車のものと考えて差し支えない。ところが、対象が電子のようなミクロなものの場合には、これに電磁波(光子)を当てると散乱されて測定前の速度から大きく変化してしまう。このように、ミクロの世界の物理量を直接的に知ることは一般には困難になると推察されるが、その場合でも、測定そのものはマクロな世界の出来事であり、その結果については確実な規定ができるというのが量子力学の基本的な立場なのである。

古典力学と何が違うか

さてその量子力学は、多少とも我々の知っている「万物はニュートンの法則にしたがう」古典力学と、実際上、何が違うのかをざっと並べてみることにしよう。まず第一の違いは、古典力学では物理量は連続的な値を取るが、量子力学では一般にとびとびの非連続的な値となることである。「量子」という名称はここに由来する。量子力学の立て役者であるプランクの見つけたエネルギーの粒としての「光の量子性」は、その一例である。

次に挙げられるのは、物理量の測定結果が一般に一つに定まらず、バラバラになることである。これは測定につきまとう誤差のことを言っているのではない。古典力学では物体の運動はニュートンの運動方程式にしたがって完全に決まるものであった。したがって、物理量もそれによって一つに決まる。量子力学では原理的にこれが不可能であり、たかだか測定結果の確率的な分布のみが決まる。

ただし、測定する物理量に応じて、測定結果が確定するような特定の状態が存在する。例えば、ある物理量の測定を行った後、まったく同じ物理量の測定を繰り返しても測定結果は変わらない(さもなければ測定が意味をなさない)。すなわち、測定によって確率的に確定した状態が実現される。ところが、一般に(共存的ではない)二つ以上の物理量に対しては、同時に確定的な状態をつくることはできない。どうやっても、どちらかの測定の結果は統計的にばらついてしまうのである。これがよく知られたハイゼンベルクの不確定性原理である。

最後に挙げられる量子力学の特徴は、状態の「重ね合わせ」の可能性である。池の水面に小石を落とせば、着水点から同心円状に周りに拡がる波が見える。二個の小石ならば、それぞれの波が重なり合い、互いに干渉し合う。このような波動に特有な干渉現象は、状態の重ね合わせが作り出すものである。重要なのは、量子力学ではあらゆる複数の状態の重ね合わせ状態が存在するということである。これによって、例えば光子の波動性と粒子性の両方が説明できることになる。もちろん古典力学では、物体の運動の重ね合わせなどあり得ない。波動現象以外の重ね合わせは物理的に意味をなさないから、これに対応する規定も存在しない。

以上の古典力学と決定的に異なる量子力学のエッセンスを、次頁に箇条書きにしてまとめておくことにしよう。なお、これら五項目に、本書では必要としないが、シュレーディンガー方程式と呼ばれる「状態の時間発展の規定」を加えると、量子力学の完全な体系ができあがる。参考のため、古典力学との対照表を併せて掲げておこう(表1)。

興味深いことに、測定によって引き起こされる(コラムのなかの)[3]の状態収縮はシュレーディンガー方程式による時間発展とは別のものであり、したがって量子力学にはこれら測定による変化と時間発展による変化の異質な二つの状態変化が併立していることになる。この異質なものの併立は量子力学の不満足な点の一つであり、「シュレーディンガーの猫」で知

量子力学のエッセンス

［1］ **物理量の量子化** 物理量の測定結果は連続的な値とは限らず，一般に非連続的な値となる．どの値が許されるかは，物理量によって決まる．

［2］ **測定結果の確率性** 物理量の測定結果は一般に統計的にばらつき，どの測定結果になるかは確率的にしか決まらない．

［3］ **測定後の状態収縮** 測定後の系の状態は，測定した物理量の確定した特定の状態になって(収縮して)いる．

［4］ **不確定性原理** 一般に 2 つの物理量を測定したとき，それぞれの測定結果の統計的なばらつきを同時にゼロにすることはできない．

［5］ **重ね合わせの原理** 系の状態が 2 種類あるとき，それらを「重ね合わせた」状態も存在する．

表 1 古典力学と量子力学の対照表(1 個の粒子を記述する場合)．

	物理量	測定結果	測定後の状態	不確定性	重ね合わせ	時間発展
古典力学	連続量	確定的	変化しない	なし	なし	ニュートンの運動方程式
量子力学	非連続量(または連続量)	統計的	確定的状態に変化(収縮)	あり	あり	シュレーディンガー方程式

られる量子力学の観測問題は、この問題に関わるパラドックス——測定する前は、死んでいる猫の状態と生きている猫の状態が共存——に起因している。

電子のスピン

先に述べた量子力学の五項目は抽象的な規定だったので、その実際の内容の理解のために、スピンという ちょっと変わった物理量を例に各項目の意味を説明することにしよう。スピンとはコマの自転のような自分自身の回転の物理量のことで、古典力学では自転角運動量と呼ばれるものである。地球からサッカーボールまで、ふつうに考えられる系はすべて自転することができるが、これはミクロの世界でも同じであって、電子や光子のような素粒子も例外ではない。

量子化とは

サッカーボールの回転の状態は、回転軸の方向と回転の速さによって特徴づけられ、これらの量は外部からのコントロール次第で、自由に変えることができる。ところが電子の自転はこれとはまったく異なる。電子の自転の状態を調べるには、一般に電荷を持つ粒子が自転するとそれ自身が電磁石のようになるので、強度勾配のある磁石の中を電子が通ると、自転

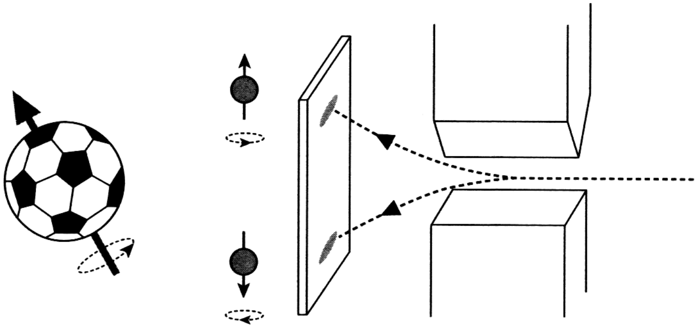


図 1 サッカーボール(左)の回転は，その回転軸も回転の速さも自由に変えることができる．一方，電子(右)の自転の場合は，回転軸は測定の方向に限定され，回転の速さも 2 種類(右巻きと左巻き)しか存在しない．もし電子がサッカーボールのように自由に回転軸も回転の速さも変えられるのであれば，磁石を通る軌跡の到達点は上下に伸びる帯のようになるはずであるが，実際の測定結果は，上端と下端の 2 カ所に限定されている．

の大きさや向きに応じて運動方向が曲げられることを利用する。実際に測定してみると、奇妙なことに、回転の「速さ」は測定方向の周りに二種類しかないことがわかる(図1)。これが物理量(スピン)の量子化である。これらの二種類の状態を、測定方向に関してそれぞれ「右巻き」、「左巻き」状態と呼ぶ。しかもこのようなスピンの量子化は、どの方向に測っても起こる。不思議な性質であるが、動かせない実験事実である。

なお、電子のスピンを例にとっているのは、測定結果の場合の数が二つしかなく最も簡単な(一つの場合は自明になる)ことがその理由であり、とりたてて自転という物理量が重要なわけではない。実

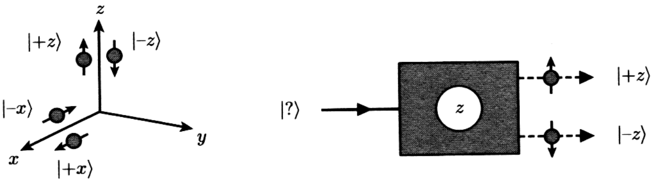


図 2　どのような状態の電子を持ってきても，z 方向のスピンの測定結果は量子化されて右巻きと左巻きの 2 つしかない．この量子化された測定結果は，3 次元空間のどの方向でも同様に起こる．左図では z 方向と x 方向のスピン状態のみを示してある．

際、測定のみに注目するならば、電子のスピンは赤玉、白玉のどちらか一個が入った箱の系になぞらえることができる。測定操作は箱の蓋を開けることに相当し、中の玉が赤ならば右巻き、白ならば左巻き、というわけである。

さていま、3次元空間の中に直交座標系をとり、そのz方向に関してスピンが右巻きの電子の状態を$|+z\rangle$、左巻きの状態を$|-z\rangle$と書き表すことにしよう(図2)。図では、右巻きの状態$|+z\rangle$を上向きの矢印で、左巻きの状態$|-z\rangle$を下向きの矢印で示す。電子のスピンの量子化は任意の方向に起きるから、例えばx方向に関しても右巻き状態を$|+x\rangle$、左巻きの状態を$|-x\rangle$と書くことになる。

ここで、z方向に右巻きの状態$|+z\rangle$の電子を多数用意し、それぞれのx方向のスピンを測ることにしよう。すると量子化によって結果は二種類しかなく、x方向についての右巻き状態$|+x\rangle$である場合と、左巻き状態$|-x\rangle$である場合とが、それぞれが等しい確率(つまり$|+x\rangle$が五〇%、$|-x\rangle$も五〇%の割

合)で現れる。ただし確率は決まっているが、個々の測定結果はランダムであって、どちらになるかはまったくわからない。これが、量子力学の言う測定結果の確率性(個々の結果は確定していないが、統計的な確率は定まっていること)の意味である。なお、z方向とx方向を入れ替えて、状態$|+x\rangle$の電子のz方向のスピンを測っても、同じ確率で$|+z\rangle$または$|-z\rangle$が得られる。これは空間が等方的である(物理的に特別な方向はない)ことによるものである。

状態収縮とは

測定前の状態がどんなものであったとしても、測定後の状態は測定方向について、右巻き、左巻きのどちらかの状態になる。例えばz方向のスピンの測定後の状態は、右巻き、左巻きの測定結果に応じて$|+z\rangle$または$|-z\rangle$に変化してしまう。これが状態収縮である。そしていったんどちらかの測定結果が出たら、その後はいくら同じ測定を繰り返しても状態は変わらない。赤玉、白玉の入った箱の描像で言えば、一度蓋を開けて中の玉の色がわかったら、その後、何度蓋を開けても玉の色は変わらない。つまり、測定後の状態からは測定量に関する不確定性は消えて、その測定に関する限り、確定的な状態になっているのである。

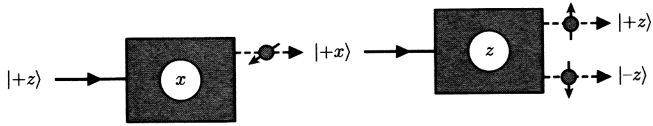


図 3　z 方向に右巻きスピンの状態 $|+z\rangle$ を，さらに x 方向のスピン測定器にかけて，仮に $|+x\rangle$ 状態だと判明したとき，その状態を再び z 方向のスピン測定器にかけると，今度は $|+z\rangle$ と $|-z\rangle$ とが等確率で現れる．

不確定性原理とは

いま電子のz方向のスピン測定の結果、右巻き状態$|+z\rangle$だと判明したとしよう。この測定後、続いて他の方向のスピンの値も測定することとし、例えばx方向についてのスピンを測定すると、その結果は先に述べたように$|+x\rangle$と$|-x\rangle$が等しい確率で現れる。このうち右巻き$|+x\rangle$であった場合には、先の測定結果と合わせて、その電子はz方向、x方向ともに右巻きであると判断したくなる。しかし、残念ながらそうは行かない。なぜなら、引き続いて状態$|+x\rangle$に対してもう一度z方向のスピンを測ったとすれば、前に述べたように$|+z\rangle$と$|-z\rangle$が等確率で現れることになり、z方向のスピンの値が再びまったくランダムになっていることがわかるからである(図3)。このことは、ひとたび測定を行うと、系は他の方向のスピンに関する測定前の情報を、一切失ってしまうことを意味する。すなわち、z方向にもx方向にも同時に一〇〇%の確率で右巻き(または左巻き)だと判定されるような特別な状態は存在しない。これが不確定

性原理の意味するところである。

重ね合わせとは

ところで、重ね合わせの原理によれば、二つの状態$|+x\rangle$と$|-x\rangle$を重ね合わせた状態も存在しなければならない。これらは波動の状態ではないのでその重ね合わせを直感的に想像することは難しいが、これらを等しく重ね合わせた状態のx方向のスピンを測ると、当然ながら右巻き$|+x\rangle$と左巻き$|-x\rangle$が等確率で現れる。面白いことに、さらに重ね合わせの重み（位相と呼ばれる量）をうまく調整すれば、できた状態のz方向のスピンが、必ず右巻き状態$|+z\rangle$になるようにすることもできる。つまり、$|+x\rangle$と$|-x\rangle$の重ね合わせから$|+z\rangle$が作られるのである。また重ね合わせの別の調整をすれば、$|-z\rangle$を作ることもできる。これは波動の干渉効果に類似の現象である。

もし状態を数学のベクトルのような方向と大きさを持つ量だと思えば、それらの重ね合わせはベクトルの和に相当する。重ね合わせ具合の違いによって様々な状態ができることは、図4のように、ベクトルの和が、足し合わせる際の重みの付け方で結果が変わることに対応している。そして新たにできたベクトルも、やはり何らかの状態を表しているというのが、この重ね合わせの原理の意味である。言い換えれば、重ね合わせの原理とは、任意の状

態はベクトルによって表すことができるということを述べているに過ぎない。

なお、ここではx方向のスピン状態の重ね合わせを考えているが、もちろんy方向のスピン状態の重ね合わせを考えても同じことが言える。例えば、状態$|+z\rangle$は$|+y\rangle$と$|-y\rangle$の重ね合わせ状態として実現することも可能である。実のところ、状態$|+z\rangle$が重ね合わせ状態として考えられる二つの状態の組み合わせは無数にあり、x方向やy方向の代わりに、その任意の中間的な方向についてのスピンの二つの状態を用いて重ねてもよい。

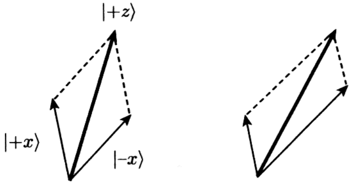


図 4　状態の重ね合わせは数学のベクトルの和として理解できる．$|+x\rangle$ と $|-x\rangle$ の重ね合わせによって $|+z\rangle$ の状態が作られ，重ね合わせの重みを変えることによって他の状態が作られる．

以上が量子力学によるスピンの記述である。これらはあくまで測定される事実を正確に述べたものであり、その内容に実験的事実と反するものはない。それでは、物理量の量子化や、測定結果の確率性、また不確定性原理といったものを、もし直感的な描像によって理解しようとすればどのようになるかを考えてみよう。

量子化と重ね合わせ

先ほど、一つのスピン方向の測定結果を理解する際に持ち出した、箱の中の赤玉、白玉という描像を、複数のスピン方向にも拡張してみよう。異なる状態には異なる色を割り当てて区別するとすれば、例えば $|+x\rangle$ や $|-x\rangle$ の状態に青玉、黄玉を対応させることができるが、すると $|+x\rangle$ と $|-x\rangle$ の重ね合わせで $|+z\rangle$ が作られるという事実は、青玉と黄玉を重ねて（？）赤玉を作ることになってやや奇妙である。そこで代わりに、色については右巻きには赤、左巻きには白に固定し、これに加えてあらゆる測定に対応できるように方向のラベル（自由度）を粒子に組み込み、測定後の状態を、その方向のラベルつきの赤か白にするという描像はどうだろうか。こうすると、$|+x\rangle$ と $|-x\rangle$ の重ね合わせで $|+z\rangle$ が作られることとは、x というラベルつきの赤玉と白玉とを重ねたら、z というラベルつきの赤玉になったということになる。どちらの場合も実在的な描像として自然なものではないが、測定による変色やラベルの変化などのメカニズムを巧妙に考えれば、量子力学の記述内容を説明できる描像となるかも知れない。

いずれにせよ、スピンという物理量は、量子化と重ね合わせの原理のため、同じ自転に関する物理量ではありながら、サッカーボールの場合とは事情が違うことが理解されたかと思う。この違いが単なる不自然さといったものに過ぎず、基本的には常識的な自然観で説明のつくものかどうかを見定めるため、いま一度、量子力学におけるスピンという物理量を吟味してみることにしよう。

スピンの常識的理解の試み

まず、電子のスピンの量子化を考えてみよう。測定の結果が二つの可能性しかないことは確かに奇妙である。しかし、ミクロの世界の性質であって我々のマクロレベルでは直接関知できないから、ミクロの物理量とはそういうものだと思うことはできるかも知れない。もしミクロな系の自転の速さが非連続的であったとしても、その非連続性のとびの幅がきわめて小さいものであれば、我々に馴染みのあるサッカーボールのように非常に多数の電子からなるマクロな系の自転の速さは連続的に見えるだろう。実際、電子の二つのスピンの値の差はプランク定数と呼ばれるきわめて小さな値に等しく、日常的なレベルでは無視できる大きさである。つまり、微小な非連続性はそもそもマクロなレベルでは感知できないのであるから、電子のスピンの量子化はいっこうに不思議なことではないという考えである。

それでは、測定結果の確率性の方はどうだろうか。図3のようにz方向に右巻きの状態$|+z\rangle$をx方向のスピン測定器にかけると、$|+x\rangle$または$|-x\rangle$の状態となって出てくるという事実は、電子と測定器との間に何らかの相互作用がはたらいて、初めの電子の状態に変化を与えていることを意味する。そもそも測定を行うということは、一般に測定対象に何らかの攪乱を引き起こすことを意味する。風呂の湯の温度を知るのに指先を水中に差し込むと、湯と

指との間に熱の交換が生じ、湯の温度にも微小ながら変化が起きてしまう。もし対象が電子のようなミクロな系であれば、x 方向の測定によってスピンの状態が変化を起こし、$|+x\rangle$ や $|-x\rangle$ といった状態になってしまうことは、十分あり得ることである。そしてそのどちらになるかは、変化に必要な z 方向からの回転軸の角度変化はどちらも直角で等しいのであるから、同じ確率になることは当然かも知れない。

実はこのような理解のしかたは、暗黙のうちに、測定とはまったく独立にスピンという自転を表す物理量が電子に実在し、それが測定によって攪乱を受け、ある特定の状態として測定されるという描像を用いていることに、読者は気づかれただろうか。この描像によれば、測定結果の確率性は多数回の測定結果の統計的なばらつきを表すものに過ぎず、一回ごとの測定結果を与えるスピンの値は、原理的には測定装置との相互作用と測定前の電子の状態によって、完全に決まっていることになる。残念ながら、我々はミクロ系の測定の完全な状況を知らないために個々の測定結果を予言できないが、これは人間の認識能力や技術的限界の問題であって、全知全能の神であれば、原理的にはすべての測定結果を完全に予言できるはずだという考えである。

この描像はきわめて自然なものであり、測定結果の確率性を理解する方法としては、おそらく唯一、常識的なものであろう。従来の古典物理学がそうであったように、また我々のマ

クロ世界での直感が要求するように、この描像ではミクロ系についても物理量の実在性が保証され、その値が相互作用や初期条件などの決定要因によって定まるとする因果的な決定論が成り立っているからである。そして量子力学というものは、状態が指定する集団に対する測定結果の統計的な記述を与える、一種の統計理論に他ならないと見ることができる。

この考えによれば、不確定性原理も単に統計的なばらつきの性質を述べているに過ぎない。サッカーボールの場合、どの方向の自転の速さも実際の自転軸と測定方向との角度差によって決めることができるから、原理的には、ボールの状態を決めればどの方向の自転の速さの値も決まってしまう。電子のようなミクロの系でも同じであり、実在するスピンには任意の方向の値が存在し、本来はzとx方向のスピンも同時に決まっているのであるが、統計的なばらつきのために、それらのスピンの測定値の確率性が不確定性原理というかたちで表されるのだと理解するのである。

アインシュタインの挑戦

アインシュタインの考えは、このような実在論に基づく量子力学の統計的解釈に立脚するものであった。彼にとっては、物理理論における実在性や因果性は欠くべからざる要素であり、それらの点で曖昧な量子力学は統計的記述を与えるものであって、不完全なものである。

そしてその背後には別の、より基礎的で完全な理論があらねばならないとしていた。このような言わば常識的な立場は、古来からの人類の世界観を踏襲するものであるから、本来、これを棄てざるを得ない何らかの根本的な理由がない限り、これを維持すべきであるのは当然のことと言えよう。問題は、この立場が科学的に貫徹できるものかどうかである。

その判断については次章以下で詳しく議論することになるが、この問題が必ずしも自明ではないことを、スピンの例で見ておこう。そのため、状態 $|+z\rangle$ は $|+x\rangle$ と $|-x\rangle$ とを等確率で含む状態であり、同様に $|-z\rangle$ も $|+x\rangle$ と $|-x\rangle$ とを等確率で含むことを思い出そう。もし $|+z\rangle$ と $|-z\rangle$ とがそれぞれ統計的に状態 $|+x\rangle$ と $|-x\rangle$ を同じ割合で混合したものならば、これらを併せた $|+z\rangle$ と $|-z\rangle$ の重ね合わせ状態も、当然、$|+x\rangle$ と $|-x\rangle$ を同じ割合で含まなければならない。ところが、先に述べたように、重ね合わせ方によっては $|+z\rangle$ と $|-z\rangle$ から純粋に右巻き状態 $|+x\rangle$ のみが作られ、そこには統計的に含まれていなければならないはずの左巻き状態 $|-x\rangle$ が消失している。これは前に述べた重ね合わせによる干渉効果のためであるが、粒子の状態に干渉が起きることとは驚くべきことであって、このような量子力学特有の現象をアインシュタインの統計的解釈によって説明することは、容易なことではない。本章の初めに掲げたボーアの言葉は、そのような容易には解釈できない事情を素直に述べたものである。ただし、問題は容易かどうかではなく、原理的に可能かどうかである。

実のところ、このような干渉効果をはじめとして、一九世紀末に明らかになったいくつかの説明のつかない物理現象に対する、やむにやまれぬ対応策の整理から生まれたものが量子力学なのであった。それゆえ量子力学では実際に測定される現象を過不足なく説明することができること、すなわち現実との対応が至上命題となっている。そしてこの使命は、現在に至るまで裏切られておらず、また理論的にも量子力学の破綻は見つかっていない。その意味で、量子力学の予言がすなわち現実の現象である、とすることは(現時点では)あながち間違いではない。どんなに一見、奇妙で常識に反することであっても、量子力学の予言は自然界の掟の表現であり、その善し悪しを人間の好みで議論しても意味のないことになる。

このような事情から、量子力学建設の父であるボーアは、測定事実とぴったり合致している量子力学的世界像こそが本来のミクロ世界での世界像であって、アインシュタインのようにその背後に別の理論――それがいくら望ましい性質を持つものだとしても――があるべきだという考えは、無益であり間違っていると主張した。すなわち、量子力学による物理系の記述は完全なものであって、測定結果の確率性や不確定性原理は本質的な自然界の姿であるとしたのである。

量子力学の結果を統計的に説明するような実在論に基づく理論は存在しないとするボーアの立場は、彼が本拠地としたデンマークの研究所の場所からコペンハーゲン解釈と呼ばれ、

長い間ハイゼンベルクをはじめ多くの物理学者の間に正統的な解釈として受け容れられた。アインシュタインの解釈は我々の素朴な常識からは理解しやすいものであるが、むしろ実験によって明らかになった「反常識的な事実」をありのままに受容することが求められたのである。次章のＥＰＲ論文による議論は、このボーアらの量子力学の正統的解釈に対するアインシュタインの敢然たる挑戦状なのであった。

2 ＥＰＲパラドックス
——量子力学は完全か？

量子論をまともに信じるわけにはいかない。なぜなら、それは幽霊のような遠隔作用などなしに、時間と空間の中における実在を物理が表現すべきだという考えに反しているから。——Ａ・アインシュタイン

ＥＰＲ論文の登場

ボーアの主導のもと、ハイゼンベルクらが完成させた量子力学は、その測定結果の不確定性や確率性にも拘わらず、むしろこれらはミクロの世界の本質なのであり、したがってその記述は完全なものであるとされた。この主張（コペンハーゲン解釈）は、アインシュタインには到底受けいれることのできないものであり、その後、ボーアとの間で激しい論争を引き起こすことになった。アインシュタインは、はじめ不確定性が回避できることを立証しようとしたが、ボーアによって逆にその議論の誤りを指摘されてしまう。そこで矛先を量子力学の完全性の問題に向けて仕切り直しを行い、同僚のポドルスキー、ローゼンの二人とともに一

九三五年に書き上げたのが、『量子力学の物理的実在の記述は完全だろうか?』と題されたEPR論文である。

米国の物理専門誌フィジカルレビューに掲載されたEPR論文は、わずか四ページ足らずの短い論文である。この論旨の明快な論文は、量子力学、とりわけ量子状態とは何かについて深刻な疑問を提出したものであったので、もともとこの問題について漠然と疑念を抱いていたシュレーディンガーがこれを読んで直ちに反応し、その意義を考察する論文を発表した。有名な「シュレーディンガーの猫」の挿話による観測問題の指摘や、すぐ後に述べる「量子もつれ」の重要性の認識とその命名も、この時のシュレーディンガーの論文によるものである。

しかしながら、EPR論文は純粋に量子力学の解釈に関するものであって、多くの人が興味を持つような新しい物理現象について議論したものではない。また、その直後に出されたボーアの反論が再びアインシュタインらの議論の誤謬を指摘したと広く誤解されたこともあって、長い間注目されることはなかった。この状況が変わるのは、次章で述べるベルの論文が一九六四年に現れ、EPR論文を再評価してからである。実際、図5の引用回数の経年変化を見れば、ベルの論文以降のEPR論文への注目度の増加の跡が著しいことがわかる。現在では、EPR論文は二〇世紀で最も引用回数の多い論文のひとつとして、しかも年ととも

に引用数が増加するきわめて珍しい論文として、広く知られるようになっている。

量子もつれ

さて前置きはこのくらいにして、EPR論文が量子力学が不完全であることを論証するため持ち出した量子もつれとは、いったいどういうものであるかを説明しよう。一般的に言えば、**量子もつれ**(エンタングルメント)とは二つ以上の部分からなる物理系があったとき、全体の系の状態が量子力学的には確定しているにも拘わらず、それぞれの部分系の状態は確定していない状態を指す。もちろん、そんなことはマクロの世界ではあり得ない。例えば二個のサッカーボールがあるとき、個々のボールの状態が決まれば、二個全体の状態も完全に決まる。逆に、全体の状態が決まっているのに、個々のボールの状態が決まってい

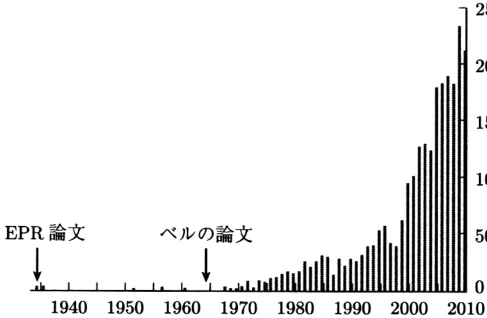


図 5 EPR論文の物理学専門誌における引用数の経年変化(Physical Review Online Archive より). 1935年の発表時から30年間ほとんど無視されたが, ベルの論文の発表以降, 劇的に引用数が増えている.

ないなどということはない。ところが、量子力学ではそのような不可思議な状態が許されるのである。その例を、前章で取り上げたスピンを用いて示すことにしよう。

いまここに二個の粒子があり、そのうち左にある粒子のスピンが右巻き状態$|+z\rangle$にあり、右の粒子のスピンが左巻き状態$|-z\rangle$であるとしよう。この二個の粒子のスピンの状態を、zを省略して単に$|+-\rangle$と書くことにする。左側が左の粒子、右側が右の粒子のそれぞれのスピン状態を表すのである。するとこれとは反対に、左にある粒子のスピンが状態$|-z\rangle$にあり、右の粒子のスピンが状態$|+z\rangle$である場合には、先ほどの取り決めによって、二個の粒子のスピンの状態を$|-+\rangle$と書くことができる。いずれにせよ、これらの場合には各々の粒子のスピン状態が一〇〇％の確率で確定していて、かつ全体の状態も確定している。前章の箱の中の玉の例で言えば、$|+-\rangle$は左の箱に赤玉、右の箱に白玉のある状態、そして$|-+\rangle$は左の箱に白玉、右の箱に赤玉のある状態に対応する。

ところが、前章で述べた量子力学の重ね合わせの原理によれば、これら二つの状態$|+-\rangle$と$|-+\rangle$の重ね合わせも、あらたに状態として存在しなければならない。もし重ね合わせを等しい重みで行うとすれば、できた状態にスピンの測定を行ったとき、状態$|+-\rangle$であると判明する確率と、状態$|-+\rangle$であると判明する確率は等しくなる(図6)。これはちょうど、状態$|+z\rangle$が$|+x\rangle$と$|-x\rangle$の等しい重みでの重ね合わせであり、したがってx方向のスピン測定を行っ

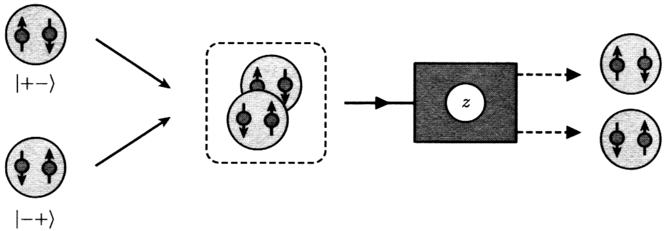


図 6　2つの粒子のスピン状態 $|+-\rangle$ と $|-+\rangle$ の重ね合わせによる量子もつれ状態(点線の枠中). 一方の粒子のスピン測定により量子もつれは「ほどけ」て, 等しい確率で状態 $|+-\rangle$ または $|-+\rangle$ にあると判明する.

たときには $|+x\rangle$ と $|-x\rangle$ が等確率で現れることと同類の現象である。

さてこのようにしてできた $|+-\rangle$ と $|-+\rangle$ の重ね合わせ状態 $|S\rangle$ が、実際に目の前に実現されているとしよう。このとき、左の粒子のスピン状態について z 方向の値を測定したとすれば、$|+z\rangle$ であるのが五〇%、$|-z\rangle$ であるのが五〇%となる。つまり、左の粒子のスピン状態は確定していない。同様に、右の粒子の状態も $|+z\rangle$ であるのが五〇%、$|-z\rangle$ であるのが五〇%となって確定していない。すなわち、部分系である個々の粒子のスピンはまったく確定していないことになる。これは、左右の二つの箱の中にそれぞれ赤玉、白玉が入っているが、どちらにどの色の玉が入っているのかはわからない場合に対応している。そして蓋を開いたとき、そのどちらの色の玉が見つかるかの確率はどちらも等しい(図7)。

ところで、個々のスピンの状態の不確定性にも拘わら

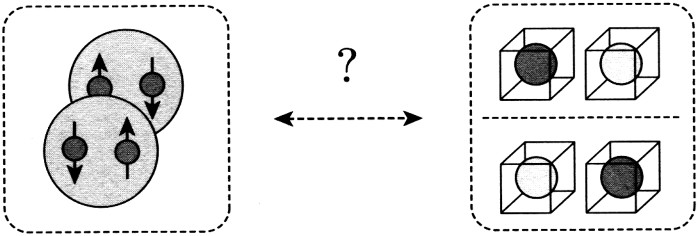


図 7　量子もつれ状態 $|S\rangle$ は，右側の左右の 2 つの箱の中にそれぞれ赤玉，白玉が入っているが，どちらにどの色の玉が入っているのかはわからない場合に対応している．

ず、二個の粒子の複合系としては、状態 $|S\rangle$ は「$|+-\rangle$ と $|-+\rangle$ の重ね合わせ状態」として確定している。なぜなら、複合系については状態 $|S\rangle$ が実現されているかどうかというYES／NOテストにあたる測定を行えば、当然ながら $|S\rangle$ は一〇〇%でYESの結果となり、その意味で $|S\rangle$ は確定した状態と見なすことができるからである。一方、個々の粒子についてはそのようなテストは存在せず、確定した状態と見なすことはできない。このことから、状態 $|S\rangle$ が量子もつれ状態であることがわかる。量子もつれの名は、部分の異なる状態が組み合わされて、あたかも「もつれている」かのようであることに由来する。

この量子もつれは、測定によって簡単に「ほどく」ことができる。例えば、左の粒子のスピンを測定し、右巻き状態 $|+z\rangle$ であると判明したとしよう。このとき、量子力学の状態収縮の規定によって、量子もつれ状態 $|S\rangle$ は状態 $|+-\rangle$ に収縮する。反対に、もし左の粒子のスピンの測定結果が $|-z\rangle$ だっ

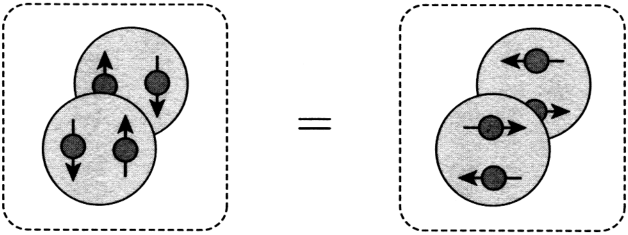


図 8 回転しても変わらない量子もつれ状態 $|S\rangle$ は，z 方向についての $|+-\rangle$ と $|-+\rangle$ の重ね合わせとしても，また x 方向についての $|+-\rangle$ と $|-+\rangle$ としても見ることができる．

たならば、今度は $|S\rangle$ は $|-+\rangle$ に収縮する。同様のことは、右の粒子のスピンの測定によっても起こる。収縮した後の状態は、それぞれの粒子のスピンが一〇〇%の確率で確定していて、かつ全体の複合系の状態も確定しているから、量子もつれはほどけていることになる。前の箱の例で言えば、実際にどちらか一方の蓋を開けてみれば、その瞬間に両方の箱に入った玉の色が確定することに相当する。

量子もつれ状態 $|S\rangle$ は $|+-\rangle$ と $|-+\rangle$ の重ね合わせ状態であったが、前に状態 $|+z\rangle$ を作る際に、x 方向についての状態 $|+x\rangle$ と $|-x\rangle$ だけでなく、ほかの方向についての状態を用いて重ね合わせてもよかったように、$|S\rangle$ を実現する重ね合わせの方法も無数に存在する。とりわけ、回転しても状態が変わらないような量子もつれ状態 $|S\rangle$ の場合には、同じ状態を与えるいろいろな重ね合わせは、ちょうど空間の回転に対応するものになる。すなわち、同一の量子もつれ状態 $|S\rangle$ が、z 方向についての $|+-\rangle$ と $|-+\rangle$ の重ね合わせだけでな

く、例えばx方向についての$|+-\rangle$と$|-+\rangle$の重ね合わせとしても作ることができるのである（図8）。

量子もつれのイメージ

先に量子もつれ状態$|S\rangle$の解釈として、左右の二つの箱の中に赤玉、白玉が入っているが、まだ蓋を開けていないのでどちらにどの色の玉が入っているかは不確定な状態に対応すると述べた。これはz方向についての$|+-\rangle$と$|-+\rangle$の重ね合わせとしての描像であった。ところが、同じ状態である$|S\rangle$がx方向についても同様に$|+-\rangle$と$|-+\rangle$の重ね合わせでもあるという事実を、もし素朴な赤白や青黄の玉の組み合わせの描像を用いて理解するとすれば、そのどちらの色の組を使うべきかは、測定者がz方向かx方向かのどちらの方向のスピンを測定するかによって決まることになる。もし測定者の決定とは独立にスピンは実在し、これに対応する箱の中の玉の色の組み合わせはあらかじめ決まっているとすれば、これは矛盾である。また、測定方向のラベルつきの赤白の玉の描像を使った場合も、赤と白の玉が共存していることはどちらの場合も同じであるが、測定方向のラベルがやはり測定者の選択によって決まらなければならず、矛盾は残る。

この矛盾を避けるには、選ばれた測定方向に応じて瞬時に色やラベルを変える仕組みを玉

に組み込んでおくことと、どの測定方向が選ばれても二つの玉が常に同じ組み合わせの色やラベルで「意気投合」したかたちで反応できるような、巧妙な仕掛けが必要となる。とりわけ、二つの粒子が遠距離に離れている場合でも、要求される「意気投合」が実現できるのかどうかが疑問になる。ここにおいて初めて、量子もつれ状態の常識的な理解の試みが、何かしら根本的な問題を含むことが見えてくるだろう。実際、ＥＰＲ論文や次章のベルの定理において、この点についての深い詮索が行われることになる。

量子力学が予言する量子もつれ状態についての直感的な描像は、まったく不可能ではないにしても、素朴なものではあり得ない。一方、実際に量子もつれ状態は不安定な原子から放出される二個の光子や、原子の崩壊反応による二個の陽子など、さまざまな現象によって生成されることが確認されている。したがって、その本質を漠然とした議論ではなく、科学的に立証できるかたちで炙り出すことが重要になる。その作業の発端が、ＥＰＲ論文なのであった。

実在性と物理理論の完全性

いよいよＥＰＲ論文の内容に立ち入ることにしよう。先に述べたように、アインシュタインはこの論文で、量子力学が完全な理論であるかどうかに疑問を呈し、事実上、不完全なも

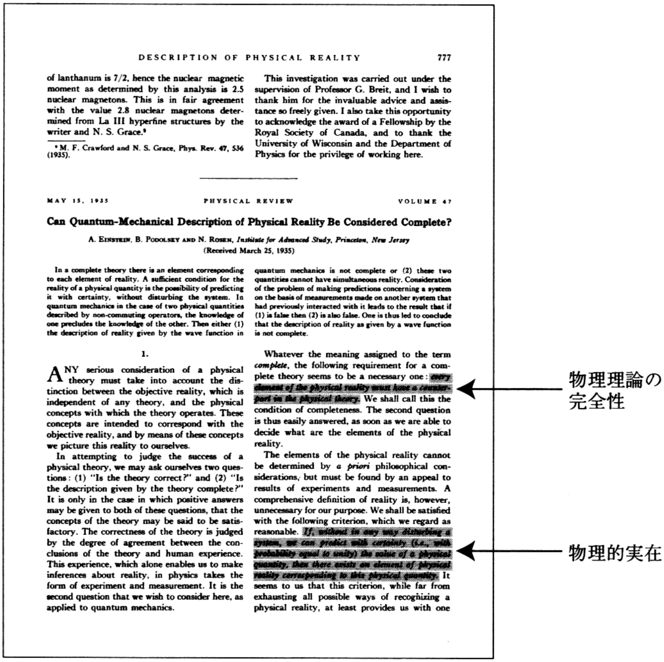
のと結論づけた。この議論を行うには、その前提としてまず物理の理論が「完全」であるとはどういうことかを定義しなければならないが、ＥＰＲ論文(図9)はこれに必要な要件として次の条件を提示した。

物理理論の完全性　すべての物理的実在の要素に対応するものが、物理理論の中にあること。

なるほど、物理理論の中に実在する対象に対応するものが欠けていれば、その理論は不完全だと言えるだろう。実在する物理量があり、その値も定まっているはずなのに、物理理論としてそれを予言できなければ完全とは言えない。そのような物理量の値は、実在の要素と言えるからである。逆に、もし対象が実在するものでなければ、その対応物の有無は問題とならない。

しかしそれでは「物理的実在」とは何であるか。これは難しい問いであるが、ＥＰＲ論文は次の要件が満たされていれば十分であると規定する。

物理的実在　もし対象の状態をまったく乱さずに、ある物理量の値を確実に(一〇〇％の確率で)予言できるとき、その物理量に対応する物理的実在の要素がある。



DESCRIPTION OF PHYSICAL REALITY 777

of lanthanum is 7/2, hence the nuclear magnetic moment as determined by this analysis is 2.5 nuclear magnetons. This is in fair agreement with the value 2.8 nuclear magnetons determined from La III hyperfine structures by the writer and N. S. Grace.[9]

[9] M. F. Crawford and N. S. Grace, Phys. Rev. 47, 536 (1935).

This investigation was carried out under the supervision of Professor G. Breit, and I wish to thank him for the invaluable advice and assistance so freely given. I also take this opportunity to acknowledge the award of a Fellowship by the Royal Society of Canada, and to thank the University of Wisconsin and the Department of Physics for the privilege of working here.

MAY 15, 1935 PHYSICAL REVIEW VOLUME 47

Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?

A. Einstein, B. Podolsky and N. Rosen, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*
(Received March 25, 1935)

In a complete theory there is an element corresponding to each element of reality. A sufficient condition for the reality of a physical quantity is the possibility of predicting it with certainty, without disturbing the system. In quantum mechanics in the case of two physical quantities described by non-commuting operators, the knowledge of one precludes the knowledge of the other. Then either (1) the description of reality given by the wave function in quantum mechanics is not complete or (2) these two quantities cannot have simultaneous reality. Consideration of the problem of making predictions concerning a system on the basis of measurements made on another system that had previously interacted with it leads to the result that if (1) is false then (2) is also false. One is thus led to conclude that the description of reality as given by a wave function is not complete.

1.

ANY serious consideration of a physical theory must take into account the distinction between the objective reality, which is independent of any theory, and the physical concepts with which the theory operates. These concepts are intended to correspond with the objective reality, and by means of these concepts we picture this reality to ourselves.

In attempting to judge the success of a physical theory, we may ask ourselves two questions: (1) "Is the theory correct?" and (2) "Is the description given by the theory complete?" It is only in the case in which positive answers may be given to both of these questions, that the concepts of the theory may be said to be satisfactory. The correctness of the theory is judged by the degree of agreement between the conclusions of the theory and human experience. This experience, which alone enables us to make inferences about reality, in physics takes the form of experiment and measurement. It is the second question that we wish to consider here, as applied to quantum mechanics.

Whatever the meaning assigned to the term *complete*, the following requirement for a complete theory seems to be a necessary one: *every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory.* We shall call this the condition of completeness. The second question is thus easily answered, as soon as we are able to decide what are the elements of the physical reality.

The elements of the physical reality cannot be determined by *a priori* philosophical considerations, but must be found by an appeal to results of experiments and measurements. A comprehensive definition of reality is, however, unnecessary for our purpose. We shall be satisfied with the following criterion, which we regard as reasonable. *If, without in any way disturbing a system, we can predict with certainty (i.e., with probability equal to unity) the value of a physical quantity, then there exists an element of physical reality corresponding to this physical quantity.* It seems to us that this criterion, while far from exhausting all possible ways of recognizing a physical reality, at least provides us with one

図 9　『量子力学の物理的実在の記述は完全だろうか？』と題された EPR 論文の冒頭．矢印の部分に，「物理理論の完全性」と「物理的実在」についての定義が与えられている．

やや持って回った言い方なので、その意味を少し具体的に考えてみよう。まず対象がある物理量を持っていると考えられたとき、それが本当に実在するかどうかを確認するには、それを何らかの方法で測定することが必要だろう。さてその測定操作によってある値を得たとき、はたしてその値は対象にもともと実在したと考えてよいだろうか。その操作が対象を攪乱したとすれば、得た値は必ずしも測定前に対象が持っていた値とは違うかも知れない。さらに、測定操作そのものが、そもそも存在しなかった物理量の値を、何らかのプロセスを通して生み出している可能性もある。

しかし、もしこの測定操作が対象の状態を決して乱さないことが保証されているならば、測定によって得られた物理量の値は対象に固有のものであって、測定前から存在していたと考えてよいのではないか。そのように考えると、この条件文の中の「対象の状態をまったく乱さずに」という条件の意味が明らかになる。つまり、対象の状態が変化していないのだから、一度測定によって得た値は、その後、何度測定を繰り返しても同じ値が得られることになり、したがってその値は対象が持つ実在する物理量の値だと判断できるとするのである。さらにもう一歩進んで、もし何らかの理由で対象の物理量の値を確実に知ることができるのならば、直接的な測定の必要さえないだろう。そのような場合は、当然ながら対象の状態は乱していないはずであるから、知り得た物理量は実在のものであると考えてよい。条件文の

「予言」という言葉には、実際の直接的な測定を行わない可能性をも考慮に入れられている。

以上の物理的実在の定義と、それに基づく物理理論の完全性の判定条件は、およそ穏当なものであって、特に欠点は見あたらないと言ってよいだろう。実際、EPR論文の直後に反論したボーアも、これらの定義を問題とはしていない。それではこの判定条件を用いて、なぜ量子力学が不完全だと言えるのか。もし量子力学が完全な物理理論であるとするならば、物理的実在に対して対応するものを必ず持っていなければならないが、そうではない証拠があげられるのだろうか。

スピンの実在と不確定性原理

ここで量子もつれがその鍵となる。前に述べた二個の粒子のスピンの量子もつれ状態 $|S\rangle$ を考えよう。いま二個の粒子が互いに非常な遠方に離れていて、一方の粒子に対する測定操作の影響が他方の粒子に及ばないような場合を考える(図10)。一方の粒子を東京に、他方の粒子をニューヨークに置くことを想定すればよい。スピンは粒子の自転に関する物理量なので距離とは無関係な性質であり、いくら二つの粒子の距離が離れていても、原理的には量子もつれ状態に変化は起きない。

さてそのような状態にある二個の粒子のうち、左の粒子の z 方向のスピンを測定したと

しよう。すると前に述べたように(図6)、等確率で$|+z\rangle$または$|-z\rangle$と判定されることになる。仮にいま$|+z\rangle$であると判定されたとしよう。このとき量子力学によれば、状態の収縮によって全体の状態は$|+-\rangle$になっていることになる。これは測定しなかった右の粒子のスピンが$|-z\rangle$であることが確定した状態である。もし粒子の右巻きスピンに+1、左巻きスピンに−1という値を割り当てるとすれば、このことは、左の粒子のz方向のスピンの測定結果が+1ならば、右の粒子のスピンの同じ方向の値は必ず−1となるということになる。反対に、もし左の粒子のz方向のスピンの測定結果が−1ならば、右の粒子のスピンの同じ方向の値は必ず+1となる。つまり、左の粒子の測定を行うことは、間接的に右の粒子の測定を行ったに等しいことになる。

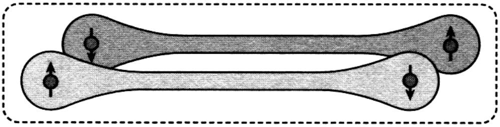


図 10 遠方に引き離された量子もつれ状態$|S\rangle$にある2個の粒子．どこまで引き離しても，スピンの量子もつれは保たれている．

この間接的な右の粒子のスピン測定は、その値に影響を及ぼすことはあり得ないだろう。なぜなら、二つの粒子の距離は十分に離れているのだから、測定の際に左の粒子に何らかの操作を加えたとしても、それが右の粒子に及ぶ気づかいはないからである。東京での粒子の測定が、ニューヨークの粒子に影響を与えるなどということは考えられない。そうだとす

ると、この測定は右の粒子の z 方向のスピンに対しては、まさに「対象の状態をまったく乱さずに」行われたことになる。そしてひとたび左の粒子の測定結果を得た段階では、一〇〇％の確率で右の粒子の測定結果を予言できることになる。実際、右の粒子に直接測定を行えば、まさにその結果が正しいことを確かめることができる。これらのことから、先の定義にしたがって、右の粒子の z 方向のスピンの値は物理的実在だという結論になる。

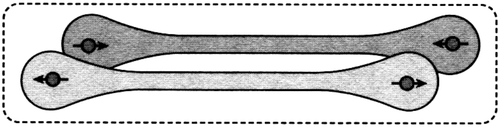


図 11 x 方向についての状態の重ね合わせとして見たときの，同じ量子もつれ状態 $|S\rangle$ にある遠く離れた 2 個の粒子.

ところで、左の粒子のスピン測定の方向は我々が自由に選んでよいから、z 方向の代わりに x 方向を選んで測定することもできるはずである。同じ量子もつれ状態 $|S\rangle$ は、回転対称性のために x 方向についての $|{+}{-}\rangle$ と $|{-}{+}\rangle$ との重ね合わせとしても見られるのであった（図8）から、二個の粒子を引き離した状態は、図10の代わりに図11のような状態だと見ることもできる。したがってその測定結果は、ふたたび等確率で $|{+x}\rangle$ または $|{-x}\rangle$ となる。これに対応して、右の粒子の状態は $|{-x}\rangle$ または $|{+x}\rangle$ となるのであるから、z 方向の測定のときとまったく同様に、左の粒子の測定を行うことによって、間接的に「対象の状態をまったく乱さずに」右の粒子の測定を行うことが

できたことになる。すると同じ理屈で、右の粒子のx方向のスピンの値もまた、物理的実在だということになる。

これで、量子もつれ状態$|S\rangle$にある二個の粒子に対しては、右の粒子のz方向のスピンとx方向のスピンの両方ともに、物理的実在であることがわかった。(もちろん、左右の粒子の役割を入れ替えて、右の粒子の測定を行って左の粒子の状態を決めることにすれば、左の粒子のスピンの値についても同様のことが言える。) さてもし量子力学が完全な理論であるとすれば、これらのz方向とx方向の二つのスピンの値に対応するものが理論の中になければならない。すなわち、これらの物理的に実在する二つのスピンの値が何であるかについて、確定した予言を与えるものでなければならないことになる。

ところが、前章の図3で説明したように、量子力学の不確定性原理が言うところは、一つの粒子のスピンのz方向とx方向の二つのスピンの値は、同時に確定していないというものであった。繰り返しになるが、量子力学の主張するこの不確定性は本質的なものである(それゆえ不確定性「原理」と呼ばれる)。ほんとうは個々の粒子のスピンの値が決まっているが、測定の誤差などの理由から統計的な意味で、測定結果には不確定性が出てしまうといったものではない。もし後者であれば、量子力学はもともと不完全なものであることを認めたことになるが、コペンハーゲン解釈によれば、量子力学による自然の記述は完全なものであ

り、そもそも不確定性原理に反するように物理量の値が決まっていることはあり得ないはずなのであった。

ＥＰＲ論文の量子もつれ状態を用いた考察は、このコペンハーゲン解釈と物理理論の完全性の条件が、互いに相容れないものであることを示した。ここに提示した物理理論の完全性の条件を受け容れる限り、物理的実在である二つのスピンの値に対応するものを持たない量子力学は、物理理論として不完全なものということになる。これがＥＰＲ論文の結論である。

局所性と完全性の対立——ＥＰＲパラドックス

以上の議論は論理的には明快なものであるが、これでほんとうに量子力学の不完全性が論証されたことになるのかどうか、もし抜け道があるとすれば、どこにその可能性があるのかについて考えてみよう。

まず気に懸かるのは、右の粒子の z 方向と x 方向の二つのスピンの値の物理的実在性を導くのに、それぞれ左の粒子に対する別々の測定を必要としたことである。つまり、各々の物理量の実在性に応じて、左の粒子に z 方向の測定を行うか、あるいは x 方向の測定を行うかを選ぶことが必要であり、これらは同時に行うことはできない。したがって、右の粒子の z

方向とx方向の二つのスピンの値が、同時に物理的実在性を持つとは言えないのではないかという疑問である。もし同時に実在性を持つのでなければ、そのような二つの物理量の値を同時に確定することが必要でなくなり、不確定性原理とは矛盾しないことになる。そうであれば、量子力学が不完全であるという結論からも逃れることができるというわけである。

確かに複数の物理量の実在性の条件として、それらが同時に実在性の条件を満たすときのみ、同時に実在すると規定することは一見、もっともらしい。しかしもしそうだとすれば、右の粒子のz方向とx方向の二つのスピンの値のどちらが実在性を持つかは、左の粒子のスピンのどちらの方向を測定するかによって決まることになる。そして左の粒子に対してどの方向に測定されたかという情報が瞬間的に右の粒子に伝わり、それによって右の粒子のどのスピン方向が実在性を持つかが決まらなければならない。東京での測定方向の選択が、ニューヨークで実在性を持つスピン方向を決めることになる。

アインシュタインの特殊相対論によれば、光速を超える情報伝達は不可能であるから、実在性の対象がこれと抵触するような瞬間的な情報伝達に依存するとすれば、それはきわめて奇怪である。仮に特殊相対論が誤っていて超光速通信が可能だとしても、瞬時の情報交換には情報を運ぶ物理的な媒体が必要になるが、そのような「幽霊のような遠隔作用」が存在するとは到底考えられない。これがEPR論文の判断であり、本章冒頭に掲げたアインシュタ

インの言明なのであった。

物理的な相互作用は遠隔作用ではなく近接的なものであるという考えは相互作用の**局所性**と呼ばれ、物理学の大前提として掲げられてきた概念である。したがって、結局のところ、量子力学においてはこの局所性と完全性が両立し得ないというパラドックスが生じていることになる。これが**EPRパラドックス**であり、アインシュタインはその解決の道を完全性の否定に求めたのである。

さらに言えば、本来、実在性とは客観的な概念であり、そこに測定者の自由な意志による主観的な選択の余地はない。現実にはある特定のスピン方向を選んで測定を行うのであって、それ以外の方向の測定はしないとしても、もし測定者が欲すれば別の方向に測定することも可能であったのだとすれば、結局、どのスピン方向に対応する物理量も、最初から実在していたと考えるべきである。このような実在の客観性の観点からも、やはり量子力学は不完全であるということになる。

しかしこの議論は、別の抜け道の可能性を示唆する。それは他ならぬ測定者の自由意志の存在に関する疑問である。自由意志とはいったい何かを物理的に規定しようとすると、「自由」とは何かについて厳密な定義を与えなければならないが、もし仮に因果律に依らないまったくのランダムな決定を「自由」とするならば、自由意志を持つには測定者というマクロ

な存在が、そのような非因果性を物理的に持たなければならない。しかし、もし人間も宇宙の中で因果律にしたがう決定論的な存在であるならば、測定者の自由意志なるものは存在せず、スピンの測定方向もあらかじめ決まっていたことになる。その場合には、ここで述べた物理量の実在の客観性の問題も生じないし、また遠隔作用を経ずとも、同じ因果の鎖によって、あらかじめ決まっていた特定のスピン方向のみに実在性を認めれば、何ら矛盾は生じない。ただし、測定者の自由意志の否定は、実証科学の根本的な前提を覆すものであって、それ自身の厳密な吟味が必要となる。大部分の科学者には、測定における自由な選択を否定することに対して、大きな抵抗があるに違いない。

ここで述べた遠隔作用の可能性と測定者の自由意志の問題は、この後のベルの定理と「自由意志定理」の話にも共通するものであるが、まずは次章で、ベルが言わば哲学的なＥＰＲの議論を、どのように実験的検証ができるかたちに深化させたかについて説明することにしよう。

3 ベルの定理
——局所性・実在性との矛盾

量子力学と相対論との緊張関係は「平和的共存」だとかつて私は考えていたが、現在はベルの説得力ある議論によって考えを変えてしまった。——Ａ・シモニー

ベルの警鐘

ＥＰＲ論文からほぼ三〇年後の一九六四年、北アイルランド出身で、スイスの欧州素粒子原子核研究機構（ＣＥＲＮ）で理論研究を行っていたベルが、『ＥＰＲパラドックスについて』と題した論文を発表した。この論文でベルは、ＥＰＲ論文の議論が単なる解釈の問題に留まらず、その考察をおし進めれば、量子力学の物理的予言と矛盾してしまう事実を指摘した。つまり、自然観のあり方に関する哲学的議論などではなく、実験的検証によって白黒をつける問題であることを示したのである。もし実験が量子力学の方に軍配を上げるとするならば、ＥＰＲ論文において当然の前提とした局所性や実在性は、自然界の正しい姿ではなくなるこ

とになる。そうであれば、これらの概念の少なくともどちらかを、好むと好まざるとに拘わらず、捨て去らねばならない。

ベルの論文のインパクトは非常に大きく、量子力学の基礎に対する実証的研究への扉を開くとともに、EPR論文が用いた量子もつれの概念の重要性を明らかにすることによって、今日の量子情報科学の発展にも大きな影響を与えることになった。その意味で、それまで見過ごされてきた量子力学の本当の威力を知らしめる警鐘を鳴らした画期的な論文だったのである。

ベルの議論は二個の粒子のスピンの測定結果に対するベル不等式と呼ばれる制限式を導くものであるが、ここではその代わりに、ある小劇の問答を通して、その本質を理解することにしよう。舞台は下町の小さな工場。ある新聞の科学部記者のあかりが、新入りのヒロシを助手にして取材に訪れるところから始まる。

「テレパシー装置」の取材

《町工場の並ぶ下町の一隅に、灰色に薄汚れた小さな建物がある。ある日の午後、建物の扉の前で、二人の記者の小さな話し声が聞こえる。》

ヒロシ ここが取材先の町工場らしいですね。それにしてもこんなところで「テレパシー

こなさそうだし。

装置」を発明したっていうのは、本当なんですかねえ。そもそもテレパシーなんて、できっ

あかり テレパシーが瞬時に遠いところにメッセージを伝えるものだとすれば、確かに眉唾ものね。でも、怪しげな話の中から埋もれた真実を探して伝えるのが、我々科学ジャーナリストの使命でもあるのよ。さあ、気を取り直して、取材にとりかかりましょ。

《あかり記者が半開きの重い扉を開いて、中に声を掛けた。》

あかり こんにちは、取材を申し込んだ新聞の者ですが。社長はおられますか？

《すると薄暗い小さな事務室の奥から、寝癖のついた頭髪をなでつけ、ずり落ちた度の強い眼鏡を持ち上げながら、一人の男が姿を現した。》

社長 やあ、お待ちしていました。科学部のあかりさんとヒロシさんですね。私が電話でお話しした社長です。と言っても社員は私のほかには誰も居ませんがね。

あかり あの、本日は「テレパシー装置」というのを完成されたとお聞きしてうかがったのですが……。

社長 ええ、そうなんですよ。なかなかすごい発明でしょう。ここで説明するより、実際にご覧になった方が早いでしょうから、どうぞこちらへ。

《いきなり通された奥の広い作業場には、真ん中に箱のようなものがあり、その左右に五

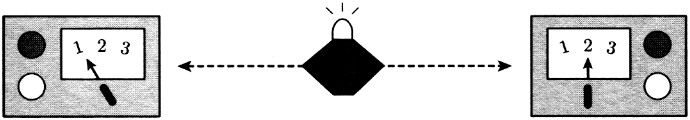


図 12　「テレパシー装置」の構成．中央に 2 つの粒子を左右に同時に発生させる装置があり，発生すると上の表示灯のシグナルが光る．粒子は左右の測定器に入り，その測定結果は赤白のランプで表示される．

メートルほど離れて、ダイヤルと赤と白の二つのランプのついた箱があった。ダイヤルの目盛は1、2、3とあり、そのどれかを選べるようになっている(図12)。》

あかり　これがその装置ですね。真ん中の箱は何でしょうか。

社長　それは粒子発生装置です。そこで二つの粒子を同時に発生させ、左右に放出するようになっています。粒子の発生頻度は六秒に一回の割合で、繰り返し発生させるように設定しています。発生したかどうかは、装置の上の黄色い表示灯のシグナルでわかるようにしてあります。さっそく作動させてみましょう。

《社長がスイッチを入れると、確かに中央の粒子発生装置の表示灯が六秒ごとにシグナルを出し、それとほとんど同時に、左右の箱のランプも光る。》

あかり　左右の箱のランプも、粒子の発生と同時に光るようですね。何かの測定器のようですが……。

社長　ええ、その通り。実は発生した粒子をとらえてその性質を測り、結果を赤や白のランプで知らせるようにしてあるんです。

ヒロシ 僕には粒子は小さすぎて見えませんが、そう言えば、左右の箱のランプはそれぞれ一回ごとに赤、白どちらかの色のランプが光り、同じ箱の二つのランプは同時に光りませんね。

社長 よくおわかりです。粒子が入ってくると、必ず、赤白どちらか一方のランプだけが光るようになっています。試しに、粒子の走るルートを何かで遮ってみれば、どちらのランプも光らなくなりますよ。

《そう言われて、ヒロシが持参した取材用ノートを粒子のルートにかざしてみると、確かに遮られた方の測定器のランプは、どちらの色も光らなくなった。》

あかり なるほど、確かにランプは粒子に反応して光っているのですね。それで、その横についているダイヤルは何でしょう？

社長 これは……。まあ、おまじないですな。このことは今はお話しないでおきましょう。

《「テレパシー装置」にしては粗末なつくりの装置に、少なからず落胆していたあかりとヒロシは、社長からの謎めいた言葉に二人で目を見合わせた。》

あかり あの、一応、取材なのでそのダイヤルの役割を教えてもらえませんか？

社長 それは伏せておきましょう。それより、今日はお二人にこの装置がなぜ「テレパシー装置」なのか、実地に体験してみませんか？

測定の回数		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	…
あかり	ダイヤル	1	2	1	3	2	1	2	1	1	3	2	3	2	3	3	
	ランプ	●	○	●	○	○	●	●	○	●	○	●	●	○	●	○	
ヒロシ	ダイヤル	2	3	1	1	3	2	2	2	3	1	2	1	3	1	3	
	ランプ	○	●	●	○	●	○	●	○	●	●	●	○	●	○	○	

図 13　あかりとヒロシのダイヤルの選択と，発光したランプの測定結果(初めの 15 回分のみ)の一覧表．2 人が同じダイヤル番号のとき(3，7，11，15 の各回)は，2 人のランプの色も必ず同じになっている．

あかり　と言いますと？

《不安げな二人の記者を横目で見ながら、社長はあかりを左の装置の前に、ヒロシを右の装置の前に導いた。》

社長　まず、左にいるあかりさん、真ん中の発生装置の表示灯が消えている間に、あなたの前にある測定器のダイヤルを自由に回してください。そして、粒子が入ったときのダイヤルの番号と、そのとき赤、白どちらのランプが光ったかを紙に記録してください。ダイヤル番号は粒子が入るたびに、例えば1、3、2、…などとお好きなように変えていただいても構いません。右にいるヒロシさんも、同じことをしてください。一〇分も続ければ、きっと面白いことがわかりますよ。

《二人は言われた通りに、粒子発生装置から出る粒子が測定器に入るごとに、そのときのダイヤル番号とランプの発光結果を記録してみた。六秒に一回の発生だから、一〇分間でちょうど一〇〇回分の記録が取れたことになる。》

社長　素晴らしい。それではお二人の結果を、同じ回の測定結

果が上下に並ぶようにして一覧表にしてみましょう。

《図13がその一覧表(初めの一五回分)である。さてこれからいったい何がわかるのだろうか。》

完全な相関

《社長から一覧表を見せられたあかりとヒロシは、しばらくの間、二人の選んだダイヤル番号と発光したランプの色の一〇〇個の列を眺めていたが、まず助手のヒロシが口を開いた。》

ヒロシ　発光した赤と白の数はほぼ同数ですね。また、左右のどちらの測定器も、発光したランプの色とダイヤル番号との間には特に関係はなさそうです。ということは、まったくランダムに発光しているのかな。

あかり　ちょっと待って。よく見ると、二人が同じダイヤル番号のときは、ランプの色も必ず同じになってるわ。

ヒロシ　ほんとうだ。赤、白、どちらの場合もあるけど、確かに同じ色になってる。

社長　さすが、科学部の記者さんですね。ご明察です。

ヒロシ　二人のダイヤルがたまたま同じだったときに同じ色のランプが光るということは、

その場合には二つのランプの色には完全な相関があるということになりますね。でも、ダイヤルは二人がお互いに相談なく、毎回自由に選んだはずです。それなのに完全相関があるっていったいどういうことだろう。違ったダイヤル番号のときには、そんな相関はみられないのに。

《困惑したヒロシの顔を見て、満足げな表情を浮かべる社長。》

社長　私の言うテレパシーというのは、この完全相関のことなんですよ。つまり、二人が同じダイヤル番号を選んだときには、必ず二つの粒子の間に同じ色のランプを光らせるよう、不思議なメッセージの交換ができているってことなんです。私の発明した装置は、それを実現するんです。

《しかし、これまで多くの詐欺まがいの発明話を聞かされた経験のあるあかり記者は、簡単には納得しない。》

あかり　これって二つの粒子が、同じダイヤルの測定のときには必ず同じ測定結果を与えるように発生装置のところで組み込まれていれば、簡単にできることじゃないかしら。

ヒロシ　と言うと?

あかり　例えば、どのダイヤル番号の測定が行われたときには、赤、白のどちらを光らせるかについて、あらゆる組み合わせを考慮した指令書をあらかじめ作り、それを両方の粒子

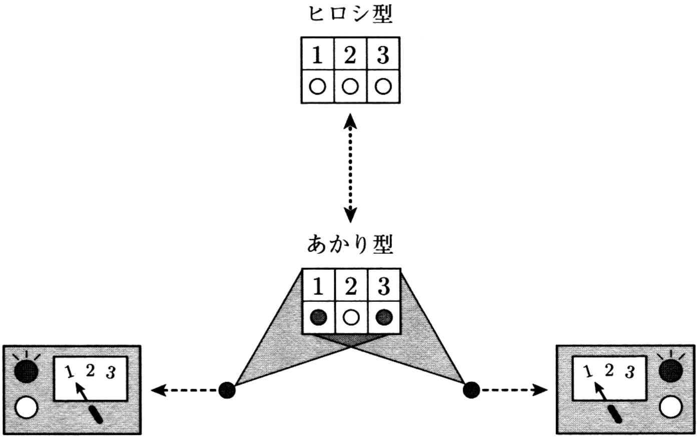


図 14　あかり(中下)とヒロシ(中上)の提案する指令書．同じ指令書を 2 つの粒子に組み込んで，その通りに測定装置に反応させれば，左右の測定装置でダイヤル番号が一致したときに，同じ色のランプを発光させることができる．例えばあかり型を組み込んだとき，左右のダイヤルがともに 1 ならば，ランプはいずれも赤色となる．

に組み込んでおくのよ。例えばこんなのはどうかしら(図14中下)。

ヒロシ　なるほど。同じ指令書を両方の粒子に組み込んでおけば、確かに同じダイヤル番号のときには、同じ色のランプを発光させるように測定器にはたらきかけることができますね。それなら、もっと簡単に全部同じ色にしてしまってもいいかも(図14中上)。このような指令書は、これらを含めて、えっと……、ダイヤル一個あたり二通りの色を割り当てられるから、全部で八通り作れますね。

あかり　そうね。そういうものもいろいろ適当に取り混ぜて、毎

回、同一の指令書を二つの粒子に組み込めば、ダイヤル番号が同じになったときの完全相関も実現できるし、赤と白の数も全体としてはうまくバランスさせることもできそうよ。

ヒロシ　指令書は、粒子の性質として組み込まれていればよいから、結局、真ん中の粒子発生装置が、そのような仕組みになっていればいいんですね。

あかり　そう。それに、私たちの推測した指令書の仕組みは、測定の結果を説明するためには必要で、かつ十分なものでしょう。実質的にはそれ以外の方法はあり得ないわよ。

《装置の仕組みを見抜いたと思ったあかりとヒロシが、自信満々に振り返って社長の顔色をうかがうと、社長はさもこれを待っていたかのように、間髪を入れずに言い放った。》

社長　ほほう。赤白の測定結果のバランスと、ダイヤル番号が一致したときの相関の情報を、粒子の中に組み込んであるとおっしゃる。まあ、ごもっともな推察です。素晴らしい……。ですが、残念ながら、そうではないんです。実際、それではうまく行かないことを証明しましょう。

ランダムの恐怖

《社長の言葉に驚きながら、二人は彼の証明なるものを聞くため、息をひそめた。》

社長　なに、証明は簡単ですよ。もう一度、測定結果の一覧表を見てください。

《二人は社長の指さす一覧表を、ふたたび目を凝らして見た。》

社長 二人の測定結果が一致する場合に注目してください。それはダイヤル番号が一致したときだけですか？

ヒロシ そういえば、ダイヤル番号が一致しない場合でも、ランプの色が同じになることもあるけど、さてどのくらいの割合でそうなっているのかな……。ざっと見たところ、ダイヤル番号が一致するしないに拘わらず、ランプの色が一致するのは全体の半分くらいで、残りの半分はランプの色が一致しないといった感じかな。

あかり そう見えるわね。もし左右の測定器にある二つのランプがランダムに発光したとすれば、(赤、赤)、(赤、白)、(白、赤)、(白、白)の四通りが同じ確率で起きるから、ランプの色が一致する確率は半分ということになるかしら。とすれば、一覧表の結果は、あたかも左右の測定器が独立にランダムに発光しているかのような結果ね。でもダイヤル番号が同じだったときの完全相関があるから、その可能性はないわけだけど。

社長 その通り。実は測定回数をもっと増やしていけば、ランプの色が左右の測定器で一致する確率は正確に五〇%になっていくんですよ。そろそろおわかりでしょうか。お二人の指令書の方法ではどうなりますか？

ヒロシ えっと、ちょっと待ってください。前に出した「あかり型」の指令書をもし二個

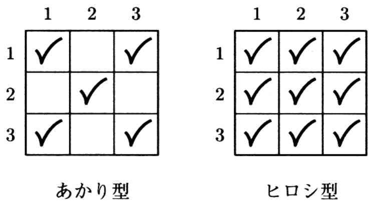


図 15　「あかり型」および「ヒロシ型」の指令書を用いた場合の，9 種類のダイヤルの組み合わせに対する左右の測定器のランプの色の一致状況．一致する場合の枠にはチェックを入れてある．一致の確率は，「あかり型」が 5/9，「ヒロシ型」が 1 となり，いずれも半分より大きい．

の粒子が共有していたとすると、これに基づいて左右の測定器のダイヤル番号の九種類の場合に対してランプの色の組み合わせを作って、その一致、不一致を表にすると図15左のようになりますね。測定者が自由に選ぶ九種類のダイヤル番号の組み合わせは、回数を増やせばすべて同じ確率で現れるだろうから、ランプの色が一致するのは全体の $\frac{5}{9}$、不一致が $\frac{4}{9}$ の割合となりますね。$\frac{5}{9}$ は五五・五…%で半分より大きい。

《ヒロシの答えに頷いた社長は、さらに続けて》

社長　ほかのタイプの指令書ではどうでしょう。

ヒロシ　赤が二個、白が一個の「あかり型」指令書で、ダイヤル番号の割り当てを変えたとしても結果は変わりません。赤が一個、白が二個の場合も同じです。これらは番号や色の入れ替えだけなので、左右で色が一致する場合の数には影響しませんから。僕が提案した「ヒロシ型」の方は全部同じ色なので、明らかに一〇〇%、ランプの色が一致します（図

15右)。

あかり　ということは、各回の粒子にこれらの二つのタイプの指令書を、どのようにとり混ぜて組み込んだとしても、左右で色が一致する確率は5/9より下がることはないわね。実際の測定から得られる五〇％には絶対にならない。

ヒロシ　色が一致する確率を下げるには、二つの粒子に持たせる指令書を別のものにする方法がありますね。例えば一方の粒子の指令書にある色の組み合わせとまったく逆の指令書を他方の粒子に持たせれば、左右のダイヤルの組み合わせによらずに、いつも不一致となって全体の一致確率を下げられます。でもそうしたら、もし左右のダイヤルが同じ場合には、同じランプの色にならなくなる。こりゃあ、どうやってもだめだ。

《社長は二人の記者の議論に深く満足した様子で、微笑みをうかべながら厳かに宣言した。》

社長　どうやら、この装置の本当の価値を理解していただけたようですな。お察しの通り、私の装置が達成する測定結果の完全相関は、全体としてはランダムな色の組み合わせの中で実現したものであって、これは指令書のような仕組みでは絶対に不可能なのです。

《あかりは、少しのあいだ目を閉じて、いまここで目撃したことをもう一度、頭の中で整理した。》

あかり　つまり、この装置が達成している測定結果は、

(I)**完全相関**　左右のダイヤル番号が一致するときは、二つのランプの色は必ず一致する。

(II)**ランダム性**　左右のダイヤル番号に拘わらず、すべての測定結果について見れば、二つのランプの色が一致する場合としない場合とは同じ確率で現れる。

というもので、これらの二つを満たすような指令書は存在しないということなのですね。

社長　その通り。そういった指令書は、論理的にあり得ないんです。ということは、二つの粒子は指令書などなしに完全相関を作り上げていることになります。これは、粒子が測定器に入った後にダイヤルの番号を知り、その上で、二つの粒子の間で何らかの情報をやりとりしているとしか考えられないでしょう。これがテレパシーなのです。

あかり　なるほど。粒子間の情報交換の話は別にしても、何か常識では理解できないことが起きていることは確かですね。

ヒロシ　(独り言で)何と。こりゃあ、凄い取材になっちゃった。それにしても、この装置の中身は何なのだろう。それにあのダイヤル番号の意味は？

「テレパシー装置」とベルの定理

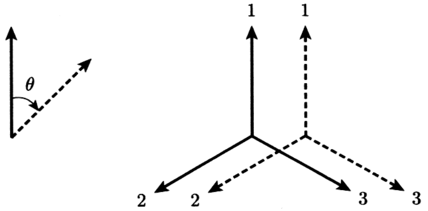
二人の取材に対して、社長は企業秘密を楯に最後まで装置の仕組みを明らかにしなかった。しかし、読者は既にお察しかも知れない。ダイヤル番号が等しいときに現れる完全相関は、前章で述べたスピンの量子もつれ状態 $|S\rangle$ がもたらす測定結果の(反)相関、すなわち左の粒子が右巻き状態 $|+z\rangle$ であれば必ず右の粒子は左巻き状態 $|-z\rangle$ であり、逆もまた然りというのと、実態として同じだからである。実際、前章では左の測定については $|+z\rangle$ に赤玉を、$|-z\rangle$ に白玉を割り当てたが、これをランプの赤色、白色に読み替え、反対に右の測定結果については $|+z\rangle$ に白色、$|-z\rangle$ に赤色のランプを割り当てれば、社長の装置の性質(I)の完全相関を再現することができる。

また、もしダイヤル番号がスピン測定の回転角を指定しているとすれば、状態 $|S\rangle$ は回転に対して不変な状態だから、測定結果の完全相関も変わらない。これは、量子もつれ状態 $|S\rangle$ が z 方向にも x 方向にも測定結果が相関していたのと、まったく同じことである。

さらに、三つのダイヤル番号に対応する回転角をうまく選べば、性質(II)のランダム性を満たすことも、簡単な量子力学の計算でわかる(次頁のコラム参照)。つまり、社長の装置とは、量子もつれ状態の発生装置と、二つのスピン測定装置を組み合わせたものにほかならなかったのである。

さて、この辺でもう一度、この「テレパシー装置」の内容と物理的な意義を検証してみよ

ランダム性の実現



量子力学によれば，電子のように2つの自由度を持つスピンが量子もつれ状態 $|S\rangle$ にある場合，それぞれの粒子のスピン測定の方向の違いを角度差 θ で表すとすれば(図左)，測定されたスピンが等しくなる確率は $\cos^2(\theta/2)$ で与えられる．したがって，もし3つのダイヤル番号が，それぞれ $120°=2\pi/3$ ずつ異なる測定方向の指定に相当していれば(図右)，2人の測定者が同じダイヤル番号のときは角度差が0，異なるときは $2\pi/3$ またはその倍の $4\pi/3$ になる．したがって，ダイヤルが一致するときに測定されたスピンが等しくなる確率は $\cos^2 0=1$，一致しないときは $\cos^2(\pi/3)=\cos^2(2\pi/3)=1/4$ となる．

一方，測定者は2人とも任意にダイヤル番号を選ぶとすれば，測定方向が一致する場合の確率は1/3，一致しない確率は2/3となる．以上の結果から

$$\text{スピンの測定値が等しくなる確率} = 1\times\frac{1}{3}+\frac{1}{4}\times\frac{2}{3} = \frac{1}{2}$$

となり，性質(II)のランダム性が実現されていることがわかる．

う。まず前段で述べられたように、性質(I)の完全相関を再現するような指令書は、あかり記者の指摘した通り、実際に存在したことを思い出そう。粒子に組み込まれた指令書という考えは、実のところ測定によって明らかになる性質を、粒子が測定前から既に持っていることに相当する。これはちょうど、EPR論文が前提とした物理量の実在性に対応するものである。このことは、左右の測定器の方向が一致する場合の完全相関が実在性のある描像で矛盾なく理解できることを意味する。

すなわち、不思議な「テレパシー」――アインシュタインの言うところの「幽霊のような遠隔作用」――を使わなくとも、実在性を持つ粒子によって完全相関は実現できるのである。EPR論文の議論は、このような遠隔作用を排除する局所性の要請と、それによって保証される実在性という常識的な自然像に基づいて、これらと矛盾する量子力学の完全性の主張を否定しようとしたことになる。

ところが、性質(II)のランダム性は、指令書によっては実現ができないものであった。これは、局所性と実在性を用いた説明が量子力学の予言を再現できないということ、つまり局所性と実在性に基づく自然観と、量子力学の(完全性ではなく)物理的な予言そのものが矛盾するという、きわめて重大な事実を示したことになる。これが**ベルの定理**の内容である。なお、ベルの議論はここで与えたものよりも一般性があり、さらに様々な拡張が行われている

が、その標準的な議論の筋道は、局所性と実在性を前提にした二粒子のスピンの相関に上限があること（ベル不等式）を示すことによって、その上限を破る量子力学の予言との矛盾を導くものである。そしてその議論の本質は、本章の説明で尽きている。

ベルの定理とその後

さてこの矛盾はどのように解かれたのだろうか。一九八二年、フランスのアスペらのグループが二つの量子もつれ状態にある光子を用いて、ベル不等式の破れを検証する実験を行った。その結果、二粒子のスピンの相関ははっきりとベル不等式を破っており、量子力学の予言と非常によく一致した。すなわち、アインシュタインが拠り所にした局所性と実在性は、少なくとも、そのどちらかを放棄しなければならないということが明らかになったのである。ベル不等式の検証実験は、その後、光子以外にも陽子や原子イオンなどを用いて、これまでにさまざまなグループによって試みられており、いずれも量子力学の予言が高い精度で確認されている。したがって、測定誤差などの点でまだ小さな抜け道が残っているものの、現在では量子力学の勝利はほとんど確実なものと考えられている。

量子力学が完全に正しいとすれば、アインシュタインのみならず、我々が常識だと考えていた局所性と実在性を再検討しなければならない。もし局所性が成り立たないとすれば、不

思議な「テレパシー」なるものは本当に存在することになるのか。また実在性が成り立たないとすれば、いったい我々はどのような自然界の姿を持たねばならないのか。

量子力学の示唆するタイプの非局所性は、実は瞬時の情報伝達としての「テレパシー」を意味するわけではない。なぜなら、量子もつれによる完全相関のみを用いて、一方から他方へメッセージを伝えることはできないことが、容易に証明できるからである。したがって、その意味では光速度を上限とするアインシュタインの相対性原理とは矛盾を起こさない。

というわけで、社長の言明には少しばかり誇張があったことになる。しかしながら、量子力学の規定する測定による瞬時の状態収縮が、あらゆる意味で相対性原理との間に齟齬を生じないかと言えば、それは必ずしも明らかではない。本章冒頭に挙げたシモニーの言葉は、かつて信じていた量子力学と相対論との平和的共存に対する疑義を表明したものである。その契機となったのは、次のようなベルの問題提起であった。

我々は、現代の理論物理学の基本的な因果的構造を表すものとして、「超光速通信の禁止」なるものに依りかからなければならないのだろうか。私にはとうてい受け入れることができない。その理由の一つは、相関が説明できるという考えを失ってしまうことであり、少なくともこの考えについて今後の再考を待つべきだからである。しかしより重

要な理由は、「超光速通信の禁止」という概念がきわめて漠然としたものであり、また漠然としか適用できないからである。「我々は光速を超えた通信ができない」という主張は、直ちに

我々とは誰のことか?

という疑問を呼び起こす。我々とは「測定」を行うことのできる者か、「場(外的要因)」を制御できる者か、それとも光速を超えないにしても何らかの「通信」が可能な者なのか。我々には化学者も含まれるのか、それとも物理学者だけなのか、植物はどうか、動物だけなのか、ポケコンはどうか、大型汎用コンピューターだけなのか?

局所性の代わりに実在性の破綻を選ぶ道は、より大きな認識の変革を我々に強要することになる。測定を行う以前に対象の性質が実在していないとすれば、測定によって客観的なものになったものは、測定前には実在となる前段階の潜在的な存在であったのか。そして潜在的な存在ならば、光速を超えた移動が可能なのか。それとも測定に関わるすべてのことがらは結局のところ「情報」に過ぎないのであるから、これらの問題は我々の持つ「情報」の問題として考えるべきであり、客観的な実在性などという概念は正しくないのではないか。は

たまた自然界は多世界であって、全体としては実在性は保たれているのか等々、さまざまな疑問や考えがこれまでに提案されたが、今もって大部分の物理学者が納得するような結論には到っていないのが現状である。

しかしその結論が何であれ、もし従来の素朴な実在性を放棄しなければならず、そしてこれがミクロの問題だけでなくマクロにも拡大されるものだとすれば、本書のまえがきで述べた問が現実のものとなる。すなわち、

月は誰も眺めていないとき、そこに実在しているのか？

測定に対応する「眺める」という行為によって、夜空に浮かぶ月の存在を確かに認めることができるけれど、はたして測定前には月は存在したのか？　少なくともミクロの世界のスピンには、それを測定する前から存在したという根拠は何もないのである。

さて量子力学が正しいとすれば、それはあるべき実在性の姿について何か言うべきものを持っているだろうか。次章ではこの問題を、少し考えてみることにする。そこに現れてくるのは、周囲の状況によって変化する新しい実在性の姿である。

4 コッヘン－スペッカーの定理
——状況に依存する実在

雨晴れて清く照りたる此の月夜又更にして雲なたなびき——大伴家持

量子力学的な実在性とは

前章までに、ベルの定理の発見とその検証実験によって、スピンの任意の方向の値が局所的に実在するという描像は、量子力学と矛盾するだけでなく、実験的にも否定されることを述べた。ベル不等式の検証実験を通して明らかになったことは、局所性と実在性に基づくベル不等式が成り立たないということだけでなく、量子力学が非常に良い精度で測定結果を再現しているという厳然たる事実であった。このことは、逆に量子力学が許容する実在性のかたちがいったいどういうものであるのかを知ることが、新しい自然像を考える上で重要になることを示唆している。

そこで、もう一度、第1章で述べた量子力学の不確定性原理の意味を考えてみることにし

よう。不確定性原理によれば、z方向とx方向の二つのスピンの測定値が同時に確定した状態は存在しないから、もしEPR論文の採用した物理量の実在性の定義を用いるとすれば、これらの二方向のスピンを同時に実在するものと考えることはできない。EPR論文で前提とした局所性が実験的に支持されない以上、これらのスピンの実在を同時に保証するものが何もないからである。

この不確定性はz方向とx方向だけでなく、どんな二つのスピンの方向に対しても、それらがたまたま同じ方向か互いに逆向きかでない限り、成り立つ一般的な性質である。つまり、粒子のスピンが実在するという描像は、実質的にはたった一つの方向にしか成立しない。肝要なことは、このようなある一つの方向にのみ実在性を持つスピンの描像は、その値が確定している特定の状態の下でのみ成り立つが、それ以外の一般の状態では成り立たないことである。つまり、系の状態とは独立な実在性の概念は、量子力学においては有効ではないのである。

ここで、スピンと並んで重要な物理量である粒子の位置(その粒子が空間のどこにあるか)の自由度を考えてみよう。位置とスピン(自転)は互いに独立な自由度であり、これらを同時に確定する状態は量子力学においても許される。すなわち、そのような状況の下では、粒子のスピンと位置の二つの物理量は同時に実在するとしても差し支えない。このように同時に

確定することのできる物理量は、互いに**共存的**な(あるいは**同時測定可能**な)物理量と呼ばれる。二つの物理量が共存的であることは独立な自由度であることと同じであり、それらが異なる二つの粒子に関する物理量であれば、必ず共存的になる。

例えば、二つの異なる粒子のそれぞれのスピンは互いに独立な自由度であって、おのおののスピン方向によらず共存的である。実際の測定においても、二つの粒子それぞれの任意のスピン方向の測定値が確定した状態が存在し、そのときにはおのおのの粒子が確かにそれらのスピンの値を持っていること、つまりそれらのスピンが実在していることがわかる。

このように、量子力学においても不確定性原理の下で共存的な物理量であれば、実験の上からも同時に実在することのできる状況が存在する。そうだとすれば、もし我々の考える実在性をそのような共存する物理量の範囲に限定しさえすれば、従来通りの素朴な描像が使えるかも知れない。

残念ながら、この期待は完全に裏切られる。それはそのような同時に実在しているという状況の下でも、**実在の状況依存性**と呼ばれる性質から逃れられないからである。これは、ある物理量の値が共存的な物理量の選択に依存し、したがってその物理量の独立した実在を考えることができないことを意味する。そしてこれはただ量子力学の枠の中にとどまらない、自然界の指し示す実在性の姿なのである。この事実を明らかにするのが、この章で述べるコ

ッヘンースペッカーの定理であるが、その説明の前に、奇怪な魔方陣の話をしておこう。

マーミンの魔方陣

状況依存性とは何かを理解するには、図16のマーミンの魔方陣と呼ばれる、縦横三つ、全部で九つのパネルの組を使うのが手っ取り早い。この魔方陣のそれぞれのマスは、赤、白のどちらかの色に光るようにできている。ただし、九つのパネル全部を同時に光らせることはできず、三列の縦のうちの一列か、または三行の横のうちの一行の、三つのパネルのみが同時に光るようになっていて、そのどれにするかは、我々が自由に決められる。つまり、縦の三列または横の三行の六つの選択肢の中から一つを選べば、その列または行に含まれる三つのランプが光るのである。

ただし、ランプは、次のようなマーミンの魔方陣特有の偶奇性の規則に従って発光する。

行の規則　横並びの三つのパネルの組は、必ず赤が偶数個(ゼロ個か二個)光る。
列の規則　縦並びの三つのパネルの組は、必ず赤が奇数個(一個か三個)光る。

魔方陣の外枠には行(1, 2, 3)と列(a, b, c)を指定する六つのボタンがついていて、これを押せばその中の三つのランプが光るようになっているから、自由にボタンを選んで、実際に

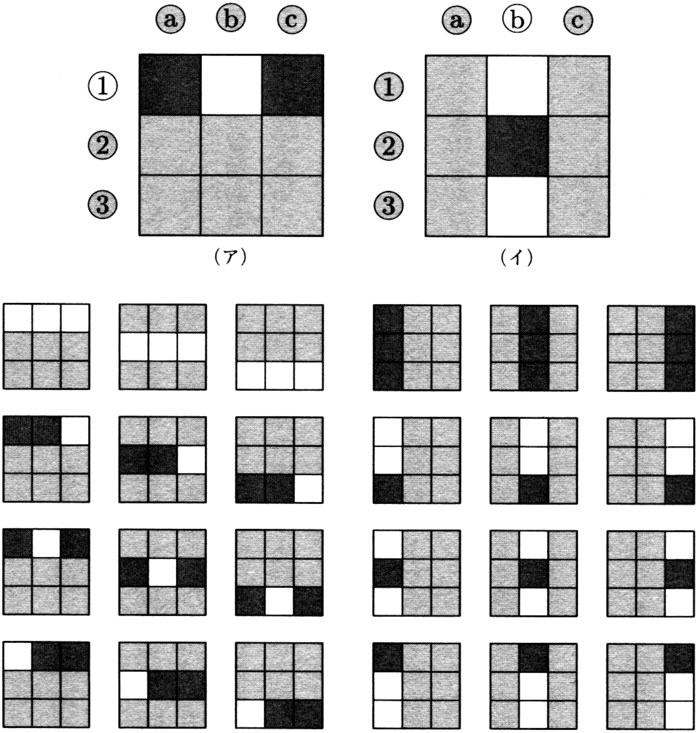


図 16 マーミンの魔方陣．外枠のボタンを 1 つ押すと，縦の列か横の行のどれかが指定され，その中の 3 つのランプが赤(■)か白(□)に光る．行，列のどちらが選ばれるかによって，規則により，光る赤の個数は偶数個，奇数個になる．(ア)はボタン 1，(イ)はボタン b を押したときの例．下の 24 個の図は，規則に従って光るすべての場合．

この規則通りに光ることを確かめることができる。さて、このマーミンの魔方陣のパネルの中に、赤、白どちらかのランプが入っていて、選ばれたボタンに応じて内部のランプが光っている可能性はあるだろうか。

答えはもちろんNoである。なぜなら、規則によれば横の一つの行には赤色のランプが偶数個あるはずだから、三行全部でも偶数個あることになるが、一方、縦の一つの列には赤色のランプが奇数個あるはずだから、三列全部でもやはり奇数個あることになって、これらは矛盾するからである。

ということは、マーミンの魔方陣のパネルの中のランプは、状況によって色が変わるようなタイプのものでなければならないことになる。ここで状況とは、同一のパネルでも、それが我々が選んだ縦の組に含まれるパネルなのか、それとも横の組に含まれるパネルなのかということを指すものであり、そのどちらかによって異なる状況にあると見なすのである。

いずれにせよ、どのパネルのランプも、状況とは独立に一つの色に固定するわけにはいかない。もし、赤のランプか白のランプかのどちらかがそれぞれのパネルの中に実在しているのかと聞かれれば、そのような固定した色のものはないが、状況によって色の変わるランプならば実在しているということができるだろう。これが実在の状況依存性という意味である。

物理量の実在と状況依存性

マーミンの魔方陣の例で述べたランプの実在の状況依存性が、実際の物理的実在とどのように関係しているかを説明しよう。まず、物理量Aが実在するときは、その値が確定しているから、これをv_Aと書くことにしよう。測定値だから通常、v_Aは実数であるが、ランプの例では赤、白の色に相当する。

いま物理量AとBが互いに共存的な物理量だとする。するとAとBが同時に確定的な値を持つことができるから、これらの値をv_A、v_Bと書こう。より一般的に、互いに共存的な物理量A、B、C、…があったとき、それぞれの確定値をv_A、v_B、v_C、…とする。これらの値が確定する特定な状態の下では、これらは同時に実在する物理量だと見ることができる。

量子力学では物理量A、B、C、…は数学的には「演算子」と呼ばれるもので表されるが、それらの間に一定の関係が成り立つときは、確定値v_A、v_B、v_C、…の間にも同じ関係が成立しなければならない。これは量子力学の要請ではあるが、実際にこれらの物理量の測定を行うと、確かに測定値の間にも同じ関係が成立していることがわかる。つまり、これは実験的事実でもあって、物理量の実在性を考える上で考慮に入れなければならない条件(コラム参照)である。

実在の条件

この関係の簡単な例は，物理量 A が z 方向のスピン s_z のとき，自分自身の 2 乗が 1 となるという条件 $(s_z)^2=1$ である．先の要請によれば，スピン s_z に対応する値 v_{s_z} も同じ関係 $v_{s_z}^2=1$ を満たすから，v_{s_z} の値は $+1$ か -1 に限られることになる．実のところ，第 1 章の「物理量の量子化」のところで説明したスピンの量子化という実験事実は，量子力学ではこのような関係から説明されるのである．

量子力学の規定する一定の関係を満たすように、共存する物理量A、B、C、…に割り当てられた値v_A、v_B、v_C、…に対しては、これらを測定値として得られるようなある特別な状態が実際に存在する。このとき、物理量の値v_A、v_B、v_C、…の実在する**状況**が存在すると言える。

そこでいま物理量Aに注目し、これと共存する別の物理量の組A、B'、C'、…を考えてみることにしよう。前とまったく同様に、これらの物理量の間に成り立つ一定の関係を満たすように値v_A、$v_{B'}$、$v_{C'}$、…が割り当てられているならば、これらを測定値として得られるような別の状況が存在する。一般に、一つの物理量Aと共存的な物理量の組は複数存在しても構わないから、このように別の共存的な物理量の組を選ぶことは可能である。ただし、別々の組に属する物理量(例えばBとB')が共存的であるかどうかはわからない。この二つの組は、あくまでAとの共存性から選ばれたに過ぎないからである(図17)。

さてここで、前の組 v_A、v_B、v_C、…の値 v_A と、後の組 v_A、$v_{B'}$、$v_{C'}$、…の値 v_A が等しいかどうかを考えたい。つまり、物理量 A は他の共存的な物理量の選び方によらずに同じ値 v_A を持つことができるのか。言い換えれば、物理量 A の実在が同時に確定する共存的な物理量の選択状況に依存する可能性——**状況依存性**——はないのかという問題である。この状況依存性は、前に述べたランプの色が、そのパネルの属する組が縦なのか横なのかによって変化するということとまったく同じものである。

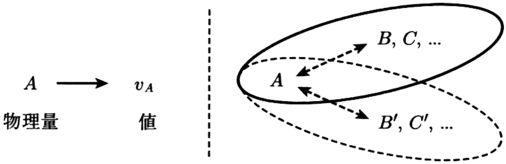


図 17 (左)物理量 A とその値 v_A.(右)物理量 A と共存的な物理量の組が, $A, B, C, \cdots$ と $A, B', C', \cdots$ の 2 組あるとき. 量子力学によれば, 1 つの組の物理量に同時に値が実在する状況は存在するが, 2 組ともに同時に物理量の値が実在する状況は一般には存在しない.

この問題をスピンの場合に具体的に説明してみよう。二個の粒子があったとき、一方の粒子(粒子1)の z 方向のスピン s_z^1(物理量 A)を測る際に、同時に他方の粒子(粒子2)のスピンも測ることとする。このとき、粒子2については x 方向のスピン s_x^2(物理量 B)を測ってもよいし、また y 方向のスピン s_y^2(物理量 B')を測ってもよい。このどちらの組み合わせも共存的な組み合わせであり、二つのスピンの値が確定する状況が存在するからである。ただし、粒子2の x 方向のスピン s_x^2 と y 方向のスピン s_y^2 は共存的では

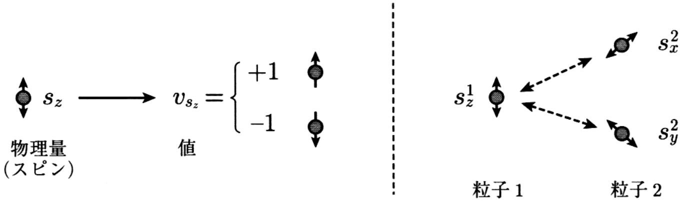


図 18　(左) z 方向のスピン s_z の値 v_{s_z} は，演算子の条件から $+1$ または -1 の 2 種類の値のみが許される．(右) 2 個の粒子のうちの粒子 1 の z 方向のスピン s_z^1 を測るとき，同時に粒子 2 の x 方向のスピン s_x^2 を測る場合と y 方向のスピン s_y^2 を測る場合とでは，測定結果は同じなのだろうか．

ないから、三つのスピン全部を同時に確定することができない。このとき、それぞれの組で共通する粒子1の z 方向のスピン s_z^1 の値 $v_{s_z^1}$ が同じになるのかどうか、これがスピンの実在における状況依存性の問題である(図18)。

繰り返しになるが、量子力学の枠組みの中では、共存する組 A、B、C、…に属するそれぞれの物理量の実在は、これらが確定した値を同時に持つような特別な状態の下でのみ言えることであって、別の共存する組 A'、B'、C'、…に属するそれぞれの物理量が実在する状態とは、一般に異なる。したがって、これらの二つの状況の下では同じ物理量 A に対して同一の値 v_A が存在するとは言えず、一般には違う値となってよい。このように、状況ごとに異なった状況依存性を持つ実在が、量子力学の主張する実在性の姿なのである。

しかし、仮に実験で確認されているような共存的な範

囲に物理量を限るとしても、このような量子力学の奇妙な実在性ではなく、より常識的な、状況に依存しない独立した実在性を持つことは不可能なのだろうか。量子力学はもしかすると限定的に過ぎて、真の実在の姿を表すことができないのではないのか。

コッヘン-スペッカーの定理

実在の状況依存性がほんとうに不可避なのかどうかを考えるため、前に述べた二個の粒子のスピンを再び取り上げよう。粒子1のスピンと粒子2のスピンは、方向によらず共存的であるから、例えば粒子1のs_x^1と粒子2のs_x^2、そしてこれらに加えて二つのスピンの積(二つを同時に測定したときの物理量)を考えれば、この三つは互いに共存的な物理量の組になっている。

このような共存的な物理量の組は、このほかにもさまざまなものを作ることができる。例えば図19の縦三つ、横三つの正方形のマスに書かれた九つの物理量は、それぞれ三個ずつ縦、横に組にすると、それぞれが共存的な物理量の組になっている。このうち、一番上の横並びの三つのマスに入った物理量の組は、先に挙げた三つのスピン物理量の組そのものである。このように、この図の中には縦横あわせて六組の共存的な物理量があり、各々の組ごとに、組の中の三つのスピンの物理量は同時に実在するものと考えてよいことになる。

s_x^1	s_x^2	$s_x^1 s_x^2$
s_y^2	s_y^1	$s_y^1 s_y^2$
$-s_x^1 s_y^2$	$-s_y^1 s_x^2$	$s_z^1 s_z^2$

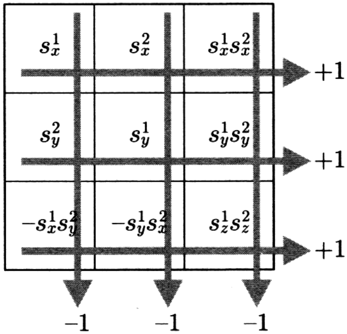


図 19 9個のスピンの物理量を共存的な縦横6組にして並べたもの(左). 演算子に対する条件 $(s_x)^2=(s_y)^2=(s_z)^2=1$ および $s_x s_y = i s_z$ (i は虚数単位)から, 本文にある条件(1), (2)が導かれる(右). 例えば, 右端の縦の組の3つの物理量の積は, $s_x^1 s_x^2 s_y^1 s_y^2 s_z^1 s_z^2 = s_x^1 s_y^1 s_z^1 s_x^2 s_y^2 s_z^2 = i^2 (s_z^1)^2 (s_z^2)^2 = -1$ となる.

さてこの九つの物理量と、これらから成る縦横の六つの組は、次の二つの関係によってその値が条件づけられている。

(1) 九つの物理量のどれでも、その二乗は1になる。

(2) 横のどの組の三つの物理量もその積は+1となり、反対に、縦のどの組の三つの物理量もその積は−1となる。

このうち、(1)の性質は、前に述べたスピンの二乗が1になるという条件から導かれる。一方、(2)の性質は、スピンが演算子として満たす積の関係(s_xとs_yの積はs_zに虚数単位iを掛けたもの等しい)によって導かれる。これらを確認することは容易なので、興味ある読者はご自分で確かめてみられたい。

さてここで、この九つの物理量がそれぞれ

$v_{s_x^1}$	$v_{s_x^2}$	$v_{s_x^1 s_x^2}$
$v_{s_y^2}$	$v_{s_y^1}$	$v_{s_y^1 s_y^2}$
$v_{-s_x^1 s_y^2}$	$v_{-s_y^1 s_x^2}$	$v_{s_z^1 s_z^2}$

$\overset{?}{=}$

−1	+1	−1
+1	−1	−1
+1	+1	+1

図 20 図 19 の 9 つの物理量が状況とは独立に実在していると仮定すると，すべての物理量にその値を割り当てることができる．こうしてマーミンの魔方陣が構成されるが，これは実数に対しては矛盾する条件となっており，実際にはそのような物理量の値は存在しない．例えば右のように値を割り当てると，右端の縦の組の積が −1 とならない．

の値が確定する状況とはまったく独立に、実在性を持つことができるものと仮定してみよう。これら九つの物理量の値は条件(1)によって+1か−1に限られるから、その値をそのまま図20のように割り当てると、結局、+1または−1が九つのマスに入ったものができることになる。大事なことは、どのマスの値もそれ自身で独立に確定した値を持っていることである。ところが一方、これらの値は条件(2)を満足しなければならないから、縦横の値の積も、それぞれ+1または−1になっているはずである。

もう勘の良い読者はお気付きのことと思う。実はここで行っていることは、先に挙げたマーミンの魔方陣を、二個のスピンを用いて具体的に構成していることに他ならない。一

つのボタンが指定する三枚のパネルの組は、共存的な三つの物理量の組に対応しており、赤、白のランプの色は、スピンの値$+1$または-1を表している。そして、もし-1を赤に、$+1$を白に割り当てれば、マーミンの魔方陣の縦横の偶奇性の規則は、ちょうど(2)の関係と同じになる。

そうであれば、前とまったく同様に、条件(2)から縦の三つの組にある-1の総数は奇数となるのに対して、横の三つの組にある-1の総数は偶数となり、これらは矛盾することになる。したがって、マーミンの魔方陣のパネルの中のランプの色がそうであったように、二つの粒子のスピンの実在も状況依存性を持たざるを得ないという結論になる。

マーミンの魔方陣の話からわかったことは、スピンのような物理量Aに値v_Aを割り当てること、すなわちAを実在するものと見なし、何らかの値が存在していると想定することが、A以外のAと共存する物理量の確定状況と切り離してはできないということである。この結果は、量子力学からの要請(条件(1)と(2))に基づいて得られたものではあるが、これらの要請はいずれも量子力学とは無関係に実験的にも検証できる基本的な物理的性質であり、その意味で自然界の要請として導かれたものと解釈できる。実在の真の姿は、一般には状況依存的だったのである。

この結論を、本章のマーミンの魔方陣で用いられた二つの粒子のスピンよりも少しだけ一

般性のあるかたちで導いたのが、コッヘン-スペッカーの定理である。この定理は前章で述べたベルの定理の少し後の一九六七年に提出され、仮にアインシュタインが想定していたような完全な物理理論が見つかったとしても、それはすべての物理量の実在性が状況に依存しないような素朴なものではあり得ないことを、数学的に証明したものであった。

状況依存性の解釈

さて実在が状況に依存するという事実は、どのように考えたらよいのだろうか。物理量Aの値v_Aが、ほかの物理量B、C、…の確定する状況に依存するということは、値v_Aがこれらの物理量の測定の状況に影響されることの現れなのかも知れない。実際、一つの粒子のスピンの測定値が、その隣にある別の粒子のスピンの測定の状況——どのように測定器を用意したか——によって影響されることは、物理的には自然なことである。右隣の粒子のスピンの測定状況はどの方向に測るかによって定められるが、それには測定器全体を測定方向に回転したり、それと同等な調整を行わなければならず、その影響が左隣の粒子に及ぶことは十分に考えられるからである。それならば、アインシュタインとしても不満であろうはずはない。

ところが、物理量Aの測定を多数回行って、その測定値の平均(期待値)を求めると、その結果はAと同時に測定する共存的な物理量の組の選択にまったく依存しないことが知られて

いる。つまり、平均値から見れば、物理量Aは状況に左右されない独立な存在であることになる。個々の測定値は他の物理量の測定の設定に依存するが、平均するとそのような依存性はきれいさっぱり消えてしまうのである。

平均値に状況依存性がないという事実を説明するには、もともと個々の測定値に状況依存性がないからだとするのが最も簡単であるが、この可能性はコッヘン-スペッカーの定理によって否定されてしまった。平均値における状況依存性の消失は、状況依存性が単に測定状況の変化の現れに過ぎないとする解釈が、必ずしも正当なものではないことを示唆している。

測定値の状況依存性が、測定状況の変化の現れだとする解釈は、前に述べた局所性との関係でも困難をひき起こす。なぜなら、もし他の共存する物理量Bの測定が、物理量Aの場所から非常に離れた遠方で行われるとすれば、局所性が成立しているときには、Bの測定の設定変更の影響が直ちにAの測定結果に及ぶことはない筈だからである。

実のところ、これはベルの考察したことに対応するものであり、その意味ではベル不等式の検証は、実在性の状況依存性が局所的な状況に留まらず、非局所的な場合でも成立するかどうかを調べたことに相当する。すなわち、二個の粒子のスピンの場合、他方の粒子の測定による一方の粒子の測定値への影響が、二つの粒子が遠く離れている場合にも存在するか

どうかの検証実験は、非局所的な状況依存性のテストに他ならない。前章の社長の「テレパシー装置」の実験によれば、左右のランプの完全相関が実在に対応する指令書なしに実現していることが判明したが、それが二つの測定器がどんなに離れていても成立することが検証されれば、非局所的な状況依存性を実証したことになる。これがベル不等式の検証実験で行われたことである。

このような考察から、量子力学的な実在性には、状況依存性がどうしても逃れられない根幹的な性質として付随していることがわかるだろう。残念ながら、どのような理由で状況依存性が生じるのか、またそれがなぜ平均化すると消えるのかについては、現代物理学はまだ確たる回答を持っていない。

5 自由意志定理
——素粒子は自由意志を持つか？

「君にいったいどうして魚の楽しみがわかるんだい」と僕に聞いたときには、すでに君は僕が魚の楽しみがわかるかどうかを知っていた。僕には川の畔で魚の楽しみがわかるのさ。——『荘子』外篇第十七・秋水篇

自由意志という暗黙の前提

この本では、ＥＰＲパラドックス、ベルの定理と局所実在論の破綻、そしてコッヘン－スペッカーの定理による実在の状況依存性について、その議論の内容と意味を紹介してきた。これらを通して浮かび上がった自然像は、一九世紀までの古典的なものの見方、あるいは我々の常識などとは到底、相容れるものではないことが、おおよそ理解されたかと思う。どうやらこの物理的世界は、我々の観察を通して漠然と理解しているものとは、根本的に違う仕組みでできているようなのである。

ただし、これまでの議論の中で暗黙に仮定され、その是非をまったく論じなかった要件が

一つだけある。それは測定者の自由意志である。

第2章の末尾でも触れたように、ＥＰＲ論文の議論では左の粒子のスピンの測定の方向を測定者が自由に決めることができ、同様に右の粒子のスピンの測定の方向も測定者が自由に決められることが暗黙の前提であった。それぞれの粒子の測定者は別々なので、その測定の方向も互いに独立に決められる。これがここで言う測定者の自由意志の意味であり、ＥＰＲ論文のみならず、その後のベルの定理の論証においても、さらにはコッヘン－スペッカーの定理の議論においても、まったく同じ意味でこの自由意志の前提が使われていた。実際、この前提の下であかりとヒロシは「テレパシー装置」の左右の測定器のダイヤルを自由に回すことができたし、マーミンの魔方陣の六つのボタンも、我々が自由に選ぶことができた。

このような意味での測定者の自由意志は、ミクロの現象や量子力学での考察のみならず、物理学全体の前提であって、これなくしてはほとんどの科学的な議論が成立しない類のものである。元来、時間的・空間的に多様な条件の下で、対象とする系がどのように変化し発展するかを取り扱うのが物理学であり、その多様な条件が実現できる最大の根拠が、我々自身(測定者)の自由意志にあるからである。物理学が成立する上で、内部では因果律に従う決定論が前提とされ、外部では非決定論的な自由意志が前提とされているというのも、皮肉な状況だと言えよう。

しかし、自由意志の存在を無批判に物理学の暗黙の前提とするのも、それ自身、科学的な態度とは言えない。そこでこの最終章では、測定者の自由意志を前提としたときに、これまでの実在性や局所性に関する考察に加えて、自由意志の裏返しとも考えられる(因果的)**決定論**——あらゆる出来事は先行する出来事によって完全に決定しているとする立場——に関して何が言えるかを考えてみることにしよう。実は最近、これまで述べた議論を組み合わせて、決定論を否定する興味深い論文が提出され、さまざまな議論を呼び起こしている。次に述べる「自由意志定理」がそれである。

魔方陣測定器

ふつう、我々は自分には自由な意志があると考えている。この本を手に取っている読者は、仮に誰かにそうするよう薦められたとしても、突き詰めれば自発的な意志でそうしているであろう。直ちにこの頁で本を閉じようと思えば、それも可能なはずなのだから。さて、このような自由意志が我々に備わっているとすれば、犬や猫など、我々人間以外にも備わっているのだろうか。もしそうならば、他の動物はどうか。植物、アメーバ、さらにはバクテリアなどはどうか。

物理的に自由意志の存在の有無を検証し、持つものと持たざるものとの境界を定めること

は、たいへん難しい問題である。自由意志そのものの定義が曖昧であることが大きな理由であるが、もしこれを先に述べた決定論からの逸脱、つまり先行する出来事によっては物事は決まらないとする非決定性の現れだと解釈するならば、物理学の議論の対象となり得る。

実際、前章までの考察と、量子もつれ状態によって実現される完全相関を用いて、もし我々が測定の方法に関して自由意志に基づく選択が可能であって、かつ局所性が満たされているとすれば、我々と同じ意味での自由意志が測定の対象である物理系にも存在することを、論理的に示すことができる。物理系はスピンを持つ粒子であれば何でもよいから、電子や光子のような素粒子でも構わない。言い換えれば、自由意志の存在境界は、非生物である素粒子にまで拡張されるというわけである。

この一見奇抜な結論は、二〇〇六年にコンウェイとコッヘンによって示された(さらに二〇〇九年に改訂版が出された)もので、彼ら自身によって「自由意志定理」と名付けられている。ここで自由意志は非決定性の意味で使われており、したがって、この定理は実質的に、世界は非決定論的であるということを主張するものになっている。第1章に述べたように、本質的に確率的である量子力学が、もしボーアの主張するように完全な理論だとすれば、世界が非決定論的であることは当然の帰結となる。しかし、EPR論文、ベルの定理、そして状況依存性を示したコッヘン-スペッカーの定理の議論がそうであったように、量子力学と

いう限定した枠組みではなく、より広い基礎理論の観点から考察しても、この非決定論が導かれるとするのがこの定理である。これはきわめて重大な主張であり、現在も論議の対象となっているが、それについては後述することとし、とにかくまず、なぜ素粒子に自由意志があるなどと言えるのか、その議論の内容を知ることにしよう。

そのため、まず前章のマーミンの魔方陣が、二つの粒子の九種類のスピンの組み合わせの測定装置として、実際に構成可能なものであったことを思い出そう。これは、そのように作られたマーミンの魔方陣が、これら九つのスピンを縦横三組、合計六組の物理量の測定装置として使うことができることを意味する。これを魔方陣測定器と呼ぼう。

さてこの魔方陣測定器を図21のように二台用意し、それぞれを左右遠くに引き離す。そしてもう一度、第3章の科学部記者のあかりとヒロシを呼び出して、あかりには左の魔方陣のボタンを選ぶ測定者に、ヒロシには右の魔方陣のボタンを選ぶ測定者になってもらうことにする。二台の魔方陣測定器は遠く離れていて、彼らが瞬時に交信できないのも第3章と同じである。

その上で、中央に社長の用いた量子もつれ発生装置を二台置こう。同時に二組の量子もつれ状態にある全部で四個の粒子を発生させて、粒子1と2を左のあかりの魔方陣に、粒子3と4を右のヒロシの魔方陣に向かわせる。このうち、粒子1と3が量子もつれしており、粒子

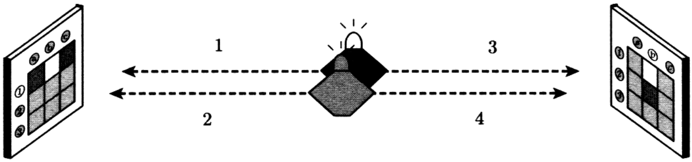


図 21　マーミンの魔方陣測定器を左右に設置し，左の 1, 2, 3 のボタン操作をあかりが，右の a, b, c のボタン操作をヒロシが自由に行なう．真ん中には粒子 1 と 3 および 2 と 4 の組での量子もつれ発生装置があり，粒子は 2 個ずつ左右に飛び出して魔方陣測定器に入る．

また同様に粒子2と4が量子もつれしている。なお、魔方陣にある六つのボタンのうち、あかりには横並びの三組を選ぶ1、2、3のボタンを、ヒロシには縦並びの三組を選ぶa、b、cのボタンを、彼らの自由意志で好きに押させることにする。このような設定の下で粒子を発生させ、あかりとヒロシのそれぞれが指定した三枚のパネルが、どのような色で発光したかを記録する。そしてこの試行実験を何度も繰り返す。さて、そうすると何が起きるのだろうか。

測定結果は何が決めているのか

多数の試行実験の後、あかりとヒロシは科学部に戻り、二人が測定した魔方陣の記録を照らし合わせると、図22のようになっていた。この測定結果から、ただちに次の二つのことがわかる。

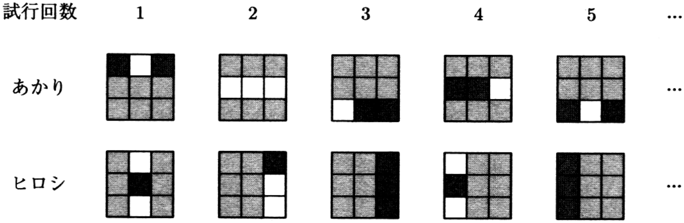


図 22　あかりとヒロシの魔方陣測定器の測定結果の初めの5回分．マーミンの魔方陣の偶奇性の規則は毎回，忠実に守られており，そのうえ各回ごとに現れる2人の間で共通する1枚のパネルの色は，いつも一致している．たとえば1回目の試行では，あかりの第1行目，ヒロシの第2列目で共通するのは第1行目の中央の1枚で，いずれも白である．

(1)　二台の魔方陣測定器ともに、偶奇性の規則を守っている。すなわち、横並びのパネルには赤が偶数個、縦並びには赤が奇数個現れる。

(2)　試行のたびに、あかりは横に、ヒロシは縦にそれぞれ三つのパネルを選ぶから、二人が選んだパネルの中に共通のパネルが縦横の交差点に必ず一枚できる。その共通パネルの色は、毎回、二人で一致している。

このうち、(1)の偶奇性の規則は、前章で述べたようにスピン物理量の間の関係から保証される。あかりの魔方陣測定器では粒子1と2の、ヒロシの魔方陣測定器では粒子3と4のそれぞれのスピン物理量を測定しているのに過ぎないから、これは前章と同じく当然の結果である。

また量子もつれの性質から、同じスピン方向の測定

値は粒子1と粒子3、および粒子2と粒子4とは必ず同じ(完全相関)になるから、あかりとヒロシがそれぞれ同じスピン物理量を測定すれば、当然、同じ結果を得ることになる。(2)の結果は、この完全相関の帰結として理解することができる。

自由意志はあるのか

《この二点を押さえた上で、ヒロシとあかり、そして科学部デスクの三人が、実験結果の意味について社内で話し合っているのを聞いてみよう。》

ヒロシ　こないだの社長の「テレパシー装置」のときと同じく、共通のパネルがいつも同じ色に光るなんて、またまた奇妙なことになってしまいましたね。

あかり　あのときは、結局、実在性と局所性の二つが両立しないということになったのよね。もし実在性を生かすとすれば、局所性を棄てなければならないことになるから、テレパシーだなんてことになるけど、たしか量子力学によれば、局所性が破れたとしても実際に情報を送れることはないそうだから、本当の意味でのテレパシーにはならないのよ。でも遠距離でも完全に相関していることが本当に確かめられているわけだから、やっぱり気持ち悪いわね。

デスク　ところで、今回も君たち二人は、測定中に何の連絡もし合わなかったのだね。そ

して二人とも独立にボタンを操作して、どの縦、横の組を測るかを決めた。君たちの自由意志で。

ヒロシ ええ、その通りです。

デスク 君たちの自由意志がボタン選択に先立つ何ものにも依らないもので、かつ二人の間に連絡がなかったとすれば、互いにどの縦、横の組を選ぶかはあらかじめ誰にもわからないから、共通パネルが九枚のパネルのうちのどれになるかもわからない。それにも拘わらず、その共通パネルの色がいつも二人で同じだということは、どういうわけなのかね？

ヒロシ 共通パネルの場所がわからないということは、左右の同じ場所にあるパネルはすべて同じ色に発光するよう、あらかじめ設定されていたってことじゃないですか。

あかり でもそれはできない相談よ。偶奇性の規則と、全部の色を同時に指定することが矛盾するから。マーミンの魔法陣の色が状況依存性を持たざるを得なかったのは、それが理由だったでしょう。

デスク 今回の実験で、君の言う状況依存性とは何を指すのかね？

あかり 私の選んだパネルの色が、ヒロシ君のボタンの選択に依存するということです。逆にヒロシ君の選んだパネルの色が、私のボタンの選択に依存するということも意味します。

ヒロシ そんな可能性は、ぜったいにあり得ませんよ。そもそも、僕の自由意志で決めた

ボタンがどれなのかを、なぜ瞬時にあかりさんの測定器が知ることができるんですか。

あかり　私もそんなことは信じられないけれど……。

《困惑している二人の記者を前にして、デスクが落ちついた声で聞いた。》

デスク　もし一方のボタンの選択には、他方のパネルの色は依存しないとするならば、パネルの色は何が決めていることになるのかね？

あかり　私の選んだパネルの色を決める原因は、私のボタンの選択と、パネルが発光するまでに私の測定器に集まった情報のほかにはありません。ちょっと大袈裟かも知れませんが、宇宙全体から時空を通してパネルの発光の瞬間までに測定器に到達できる、すべての情報です。信号や音など何でも。ただし、遠く離れたヒロシ君のボタンの選択は、ここには入りません。

ヒロシ　僕の選んだパネルの色を決める原因も同様に、僕自身のボタンの選択と、パネルが発光する前に僕の測定器に集まったすべての情報ですね。ここにあかりさんのボタンの選択は入りません。

デスク　それでは、もし君たちの言うことが正しいとすれば、二人の共通パネルの色は、いったい何が決めているのかね？

あかり　共通パネルの場所は二人が選んだもので、その色がいつも同じだということは、

これを決める原因も、先ほど二人が述べた原因のうちの共通部分しかありません。それ以外の部分は、その色を二人が別々に変える要因になりますが、実際の色は同じなので、その決定には関与していないはずですから。そうすると、片方の色だけを決める原因の中に入る二人のボタンの選択は、共通パネルの決定には関与しないことになりますね。

ヒロシ 残る決定要因は二人の測定器に集まった情報の共通部分ですか。ああ、それが共通パネルの色を決めているのか……。

《デスクは少しの間、宙を眺めて考えた後、念を押すように二人に尋ねた。》

デスク 先ほど、この実験での状況依存性とは、一方のパネルの色が他方のボタンの選択に依存することだと言ったね。ところが、共通パネルの色は二人のボタンの選択には依存しないのだから、それは状況依存性なしに決まったことになるね。

ヒロシ 論理的にはそうなります。

デスク 共通パネルの場所は二人の自由意志の結果として決まるもので、互いに通信ができないから、その場所がどこなのかは、パネルが発光する瞬間までには誰にもわからない。そうだったね。

あかり その通りです。

デスク すると、各回の試行で九枚のパネルがどれも共通パネルになる可能性があるから、

九枚全部が状況依存性なしに色が決まらなければならない。ところが、マーミンの魔方陣は、状況依存性なしに色を決めることはできない……。

ヒロシ　なるほど、確かに矛盾してますね。でもどこに問題があったんだろう。今までに仮定したことは、一つは僕たちの自由意志によるボタン選択の可能性、もう一つは一方のボタンの選択には遠く離れた他方のパネルの色が依存しないこと。でもこのどちらも棄てるわけにはいかないなあ。

あかり　自由意志と局所性の仮定ね。でももう一つ、デスクが言われた中に、パネルの色は何か別のものによって決められているという、決定論の仮定があるんじゃないかしら。

デスク　よく見抜いたね。矛盾があるということは、これらの三つの仮定のうち少なくともどれかが間違っていることになるが、もし自由意志と局所性は正しいとすれば、残る決定論が間違っていることになる。この実験の結論は、そこに落ち着くということになるのかな。

ヒロシ　決定論が間違い？　そうすると、測定器の中の粒子が測定値を出すのは、それに先立つ何らかの原因によってではなく、言わばそれ自身の自由意志によって測定値を決めているということですか。うーん、僕が自由意志を持たないとするのと、同じくらい奇妙な感じだ。

自由意志、局所性、決定論

読者は科学部の三人の会話を聞いて、どのようにお考えになるだろうか。ここでもう一度、彼らの話の骨子をまとめておこう。

まず実験結果の項目(1)、(2)は、実際の実験室でも原理的に実証可能な事実である。この二つを否定することはできない。

加えて、彼らは次の三つの仮定を置いた。

(3) **自由意志** 測定者のあかりとヒロシには自由意志があり、これに基づいて測定ボタン(スピン物理量)の選択がなされている。この自由意志とは、その発現に先立ついかなる出来事によっても決められていないもの、という(非決定論的)意味である。

(4) **局所性** あかりのボタンの選択に、遠く離れたヒロシのパネルの色(スピンの測定結果)は影響されない。あかりとヒロシの役割を入れ替えた逆もまた然り。

(5) **決定論** パネルの色は、その発現に先行する何らかの出来事によって決定される。

これらはいずれも実験的な実証が難しく、したがって原理的にはどれも否定することが可能である。科学部の三人の議論では、自由意志と局所性の仮定を正しいものとし、その代わ

りに決定論を否定することにしたのである。これがコンウェイとコッヘンの「自由意志定理」での選択であり、これから、粒子が自由意志を持つという結論が導かれる。

さてこの粒子の自由意志は、項目(3)に書かれたような測定者の自由意志と同様に、測定値が非決定論的であることを意味する。しかしながら、ここで注意すべき点が一つある。それは左右の粒子の組の測定値の発現には完全相関があるから、粒子の自由意志も互いに完全相関していなければならない。すなわち、量子もつれ状態にある粒子は、個々には自由意志を発現できず、もつれた相手との間に生じる相関を保つような、制限された自由意志しか持てないということである。もし電子にこの定理が主張しているような自由意志が存在しているとしても、互いの存在を考慮しなければならない彼らの「生活」は、我々と同様、さほど楽なものではなさそうである。ということで、たとえ決定論を放棄したとしても、完全相関という事実のもたらす局所性との緊張は避けられそうにない。

一方、EPR論文やベルの論文における大前提は局所性にあり、したがってベル不等式の検証実験によって否定されるべきものは、局所性なのだという考え方もある。この考えにしたがえば、「自由意志定理」の議論において否定すべきものは局所性であって、決定論ではない。しかし検証実験の対象となっている広い意味でのベル不等式は実在性と局所性を独立な仮定としており、その観点からは局所性のみの否定は必ずしも要請されない。また、「自

由意志定理」では実在性を直接的な対象とせず、その代わりに因果的な決定論を採りあげており、これによって量子力学を含むより広い立場から、自然界の非決定性の可能性を議論することが可能になっている。

自由意志、局所性、決定論の三つの仮定のうちどれを否定するかは、これらを選別する手段のない現段階では個人の好みによると言えるかも知れない。読者はぜひ、自分の選ぶものが何であるかをゆっくりと考えてみてほしい。夜空に浮かぶ月と、その実在について想いを巡らせたアインシュタインのように。

あとがき

アインシュタインの量子力学への疑念から始まり、実在性と局所性の葛藤、状況に依存する実在の姿、そして非決定論(自由意志)の問題にまで及ぶ物理学の基礎の旅を、これで一通り終えることになる。本書の目的は、このような実在性、局所性、決定性といった自然界の基本的要素そのものが、実際に現代の物理学研究の対象となっていること、量子力学——とりわけ量子もつれ——を通してこれらの基本的要素の間に抜き差しならぬ関係が生じていること、そしてこれらの考察を通して見えてきた自然界の姿は我々の常識とはどうしても相容れないものだという認識と驚きを、読者と分かち合うことであった。多少ともこの目的が満たされたとすれば、著者の使命は果たされたことになる。

ＥＰＲ論文から自由意志定理まで、これらの考察の背景に通奏低音として流れ、反常識的な結論を導いた根源は、我々の「反事実的」(counterfactual)な想定、すなわち実際に起きていない出来事の実在を想定したこと、にあるのかも知れない。実のところ、我々は議論の中で、実際には測定していない物理量も実在するものと想定した。測定者に選択の自由があれば、反事実的想定が許されることは当然だと思われたからである。たとえ今、月を見てい

なくても、いつでも見ようと思えば見られるのならば、月はそこに存在するに違いない。そう考えることに、いったいどんな支障があるというのだろう。

その確信が揺らいだ原因がベルの定理とその検証実験にあることは、本文で述べた通りである。しかしいったん反事実的想定への疑念を抱くようになれば、ただちに自由意志の存在の問題にも逢着する。この本の最後に、まだ論議の対象となっている最近の「自由意志定理」を取り上げたのは、このような問題意識からであった。

なお、本書ではすべての議論を最も簡単なスピンの系を用いて統一的に行った。本質を伝えるにはこれで十分であるが、それぞれの原論文で用いられた物理系とは異なる。そこで参考までに、各章の主たる文献を挙げておくことにしよう。

［第2章］　ＥＰＲパラドックス

ＥＰＲ論文は *Phys. Rev.* **47** (1935) 777 に掲載されており、湯川秀樹監修『アインシュタイン選集１』(共立出版、一九七一年刊)に邦訳がある。

［第3章］　ベルの定理

ベルの論文は *Physics* **1** (1964) 195 にあるが、本書の説明はマーミンの解説記事 *Physics Today* **38-4** (1985) 38 に基づく。なお、章末のベルの言葉は、web上のスタンフォード哲

学百科事典のシモニーによる事項解説 http://plato.stanford.edu/entries/bell-theorem/ に収められている。

［第4章］　コッヘン-スペッカーの定理

原論文は *Journ. Math. Mech.* **17** (1967) 59 であるが、本章の説明はマーミンの魔方陣を用いた簡略版 *Rev. Mod. Phys.* **65** (1993) 803 を用いた。

［第5章］　自由意志定理

この定理は *Found. Phys.* **36** (2006) 1441 および *Notices of the AMS* **56** (2009) 226 に提示されているが、本章はこれにアラヴィンドの考案 *Am. Journ. Phys.* **72** (2004) 1303 を援用したものである。

最後に、拙稿に目を通し、改善を示唆して頂いた市川翼(近畿大学)、四王天正臣(茨城高専)および東京大学大学院生の佐々木寿彦、森田辰弥の各氏に感謝する。また岩波書店編集部吉田宇一氏の量子力学の基礎に関するご興味と弛みない激励なしには、本書は完成しなかった。心から御礼申し上げたい。

二〇一一年三月

筒井　泉

さくいん

筒井 泉
1957年生まれ．東京大学教養学部基礎科学科卒業．東京工業大学大学院で学位取得後，ハンブルク大学，ダブリン高等研究所，東京大学原子核研究所を経て，現在，高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所准教授．専門は素粒子論・量子基礎論．
江戸の文人の考証や清代の書の鑑賞が趣味．個人的には，自由意志は（特に家庭内では）存在しないと感じている．

岩波 科学ライブラリー 179
量子力学の反常識と素粒子の自由意志

2011年4月27日 第1刷発行

著 者 筒井 泉（つつい いずみ）

発行者 山口昭男

発行所 株式会社 岩波書店
〒101-8002 東京都千代田区一ツ橋 2-5-5
電話案内 03-5210-4000
http://www.iwanami.co.jp/

印刷 製本・法令印刷 カバー・半七印刷

ISBN 978-4-00-029579-6 Printed in Japan

●岩波科学ライブラリー〈既刊書〉

174 **アルベロス　3つの半円がつくる幾何宇宙**

奥村　博、渡邉雅之

定価一二六〇円

「補助線の発見」が魔法のごとく見える幾何の問題には熱心なファンが多い。アルベロスとは、アルキメデスの昔から現在もなお世界中の人を魅了しつづけるふしぎな図形で、和算にも登場する。幾何の面白さを存分に堪能できる。

175 **どうする・どうなる口蹄疫**

山内一也

定価一二六〇円

海をも越えて被害が広がる口蹄疫。二〇一〇年宮崎県では家畜三〇万頭近くが殺処分となった。欧米に比べ日本の対策は科学的視点に欠けると批判も大きい。ウイルス学の出発点となった口蹄疫の歴史を振り返り、正確な知識を提供する。

176 **さえずり言語起源論　新版　小鳥の歌からヒトの言葉へ**

岡ノ谷一夫

定価一二六〇円

進化的な起源の異なる小鳥の歌が、言語進化の謎に迫るカギとなるのはなぜか。初版から七年半、性淘汰起源説に相互分節化仮説が加わった。「言語の起源は求愛の歌だった」とする進化のシナリオを、自身の研究者人生とともに描く。

177 **わたしの病気は何ですか？**

病理診断科への招待

近藤武史、榎木英介

定価一二六〇円

わたしのがん細胞をみたい。なぜこの診断がされたのか、知りたい。そんな患者の要望に、〈医療の黒子〉病理医が直接応えてくれる時代がきた。体の一部から病名をつきとめる「病理診断」の現場をわかりやすく紹介する、初めての一般書。

178 **光を止められるか**

アインシュタインが挑んだこと

米谷民明

定価一二六〇円

どんなに速く動くものでも同じ速度で追いかければ、あたかも止まっているかのように見える。はたして光は？　のちに物理学革命をもたらしたアインシュタインのこの疑問の本質をかみくだいて紹介し、一般相対論までへの進化の道筋を示す。

定価は消費税5%込です　二〇一一年三月現在